

TEXTE

130/2019

Umweltschonender Luftverkehr

lokal – national – international

TEXTE 130/2019

Umweltschonender Luftverkehr

lokal – national – international

von

Juliane Bopst, Reinhard Herbener, Olaf Hölzer-Schopohl, Jörn Lindmaier, Thomas Myck, Jan Weiß

sowie:

Carsten Alsleben, Juliane Berger, Annegret Biegel-Engler, Michael Bölke, Maxie Bunz, Andreas Burger, Ulrich Claussen, Ute Dauert, Martyn Douglas, Katrin Dziekan, Daniel Eichhorn, Frank Glante, Benno Hain, Gerolf Hanke, David Hartmann, Hans-Joachim Hermann, Falk Hilliges, Matthias Hintzsche, Hermann Kessler, Kay Köhler, Manuela Krakau, Marcel Kruse, Christoph Kühleis, Martin Lambrecht, Jürgen Landgrebe, Martin Lange, Marcel Langner, Benjamin Lünenbürger, Tina Mutert, Gertrude Penn-Bressel, Katja Purr, Jörg Reichenberg, Daniel Reißmann, Simone Richter, Nadja Salzborn, Steffen Schlömer, Martin Schmied, Jan Seven, Wolfgang Straff, Roman Thierbach, Myriam Tobollik, Julia Treichel, Thomas Voigt, Carla Vollmer, Ulrike von Schlippenbach, Ulrike Wachotsch, René Weinandy, Frank Wetzels, Dirk Wintermeyer, Frank Wolke, Jördis Wothge


Umweltbundesamt

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2104-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Lektorat:

Christiane Hoffmann

Abschlussdatum:

November 2019

Redaktion:

Fachgebiet I 2.3 Lärminderung im Verkehr
Jörn Lindmaier, Juliane Bopst, René Weinandy

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2019

Danksagung:

Wir danken den Teilnehmerinnen und Teilnehmern am Expertenworkshop im Dezember 2019 für ihre Hinweise und Vorschläge:

Regine Barth, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung

Dr. Dietrich Brockhagen, Atmosfair gGmbH

Dr. Martin Cames, Öko-Institut e.V.

Prof. Dr. Hartmut Fricke, Technische Universität Dresden

Prof. Dr. Sven Groß, Hochschule Harz

Dr. Ullrich Isermann, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR)

Michael Jäcker-Cüppers, Arbeitsring Lärm der Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V. (ALD)

Thomas Jühe, Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmkommissionen (ADF)

Wolfram Knörr, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Prof. Dr. Paul Peeters, Breda University of Applied Sciences, Niederlande

Dr. Werner Reh, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND)

Dr. Arne Roth, Bauhaus Luftfahrt e.V.

Prof. Dr. Robert Sausen, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR)

Dr. Janina Scheelhaase, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Kurzbeschreibung: Umweltschonender Luftverkehr

Nachhaltige Mobilität setzt leistungsfähige und zugleich umweltschonende Verkehrssysteme voraus. Eine bedeutende Rolle kommt dabei dem Luftverkehr zu, der global einen schnellen Personen- und Warentransport ermöglicht. Steigende Nachfrage hat dazu geführt, dass der Luftverkehr in der Vergangenheit deutlich zugenommen hat und nach einschlägigen Prognosen zukünftig weiter wachsen wird. Damit verbunden sind jedoch erhebliche Umwelt- und Gesundheitsprobleme, die vor allem durch Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie durch Lärm verursacht werden. Zu ihrer Verringerung unternehmen Verwaltung, Politik und Luftfahrtbranche zwar einige Anstrengungen, die aber nicht ausreichen, um die erforderlichen und daher gesetzten Klima- und Umweltschutzziele zu erreichen. Die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens erfordern, die durch den Menschen hervorgerufenen Treibhausgasemissionen bis 2050 nahezu auf null zu reduzieren. Aktuelle Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation zeigen zudem, dass zum Schutz der menschlichen Gesundheit die Lärmbelastungen an Flughäfen deutlich verringert werden müssen. Ebenso sind die negativen Auswirkungen des Luftverkehrs auch hinsichtlich des Flächen- und Ressourcenverbrauchs zu mindern. Planung, Organisation und Durchführung des Luftverkehrs müssen sich daher grundlegend ändern und gesamtheitlich betrachtet werden.

Die vorliegende Studie beschreibt eine Strategie für einen umweltschonenden Luftverkehr der Zukunft. Dabei werden konkrete umwelt- und verkehrspolitische Ziele genannt, die in einem ersten Schritt bis 2030 und dann bis 2050 vollständig zu erreichen sind. Die Strategie besteht aus acht zentralen Bausteinen:

- ▶ Baustein 1: Infrastruktur nachhaltig gestalten
- ▶ Baustein 2: Kurzstreckenflüge auf die Schiene verlagern
- ▶ Baustein 3: Klimarelevante Emissionen minimieren
- ▶ Baustein 4: Lärm reduzieren – Bevölkerung schützen
- ▶ Baustein 5: Externe Umweltkosten dem Verursacher anlasten
- ▶ Baustein 6: Für saubere Luft vor Ort sorgen
- ▶ Baustein 7: Ressourcen schonen, Rohstoffe effizient nutzen
- ▶ Baustein 8: Weniger fliegen

Die Bausteine sind aufeinander abgestimmt und miteinander verzahnt. Nur durch das Zusammenwirken aller Bausteine kann der Luftverkehr bis zum Jahr 2050 die Ziele des Klima-, Umwelt- und Gesundheitsschutzes erfüllen. Sie beschreiben Maßnahmen und Instrumente auf internationaler, nationaler und lokaler Ebene, die sowohl Innovationen und technische Möglichkeiten fördern und über ökonomische, ordnungsrechtliche und kommunikative Instrumente die Nachfrage beeinflussen. Die Strategie ist somit umfassend und ganzheitlich. Um rasche Fortschritte zu erzielen, wurden die Maßnahmen und Instrumente so gestaltet, dass Deutschland und Europa zum einen Vorreiter für mehr Umwelt- und Klimaschutz im Luftverkehr sein können und zum anderen durch internationale Aktivitäten Einfluss auf die internationale Staatengemeinschaft genommen werden kann.

Die Strategie zeigt einen realistischen und gangbaren Weg auf, Luftverkehr bis zum Jahr 2050 weitestgehend umwelt- und gesundheitsschonend durchzuführen. Der Luftverkehr der Zukunft wird mit leiseren, emissionsarmen und ressourcenschonenden Luftfahrzeugen durchgeführt werden. Ein solcherart nachhaltiger Luftverkehr zeichnet sich dadurch aus, dass seine Umweltauswirkungen wirksam gemindert sind und er gleichzeitig den Mobilitätsbedürfnissen der Menschen genügt.

Abstract: Environmentally friendly air traffic

Sustainable mobility requires efficient and environmentally friendly transport systems. In such a system, aviation provides fast transport of passengers and goods worldwide. Increasing demand has led to a significant increase in air traffic, and sustained growth is expected in future. However, this is associated with significant environmental and health problems, primarily due to the emission of greenhouse gases, air pollutants, and noise. Efforts made to date by the administration, politics and the aviation sector are not sufficient to meet important climate and environmental goals. The objectives of the Paris Agreement on Climate Change require that human greenhouse gas emissions be reduced almost completely by 2050. And current recommendations of the World Health Organization demand that noise pollution at airports be significantly reduced to protect human health. Likewise, the negative effects of aviation with respect to land use and resource consumption should be diminished. The planning, organization and operation of aviation must therefore change fundamentally and be considered as a whole.

The present study describes a strategy for the environmentally friendly aviation of the future. It identifies concrete objectives for environmental and transport policy to be achieved by 2050 with an intermediary step for 2030. The strategy consists of eight key modules:

- ▶ Module 1: Making the aviation infrastructure sustainable
- ▶ Module 2: Relocation of short-haul flights to rail
- ▶ Module 3: Minimizing climate-relevant emissions
- ▶ Module 4: Reducing noise - protection of the population
- ▶ Module 5: Charging the external environmental costs to the polluter
- ▶ Module 6: Ensuring clean air
- ▶ Module 7: Using resources efficiently
- ▶ Module 8: Flying less

These modules are coordinated and interlinked. Only in concert of all components can air traffic meet the goals of climate, environmental and health protection by the year 2050. The modules describe measures and instruments at international, national and local level. They promote innovative technical options and influence the demand side with economic, regulatory and communicative instruments. The strategy is thus comprehensive and holistic. To be effective soon, the measures and instruments have been designed in such a way that Germany and Europe can move ahead and be pioneers for more environmental and climate protection in aviation and, at the same time, influence the broader international and global community.

The strategy shows a realistic and viable path for aviation to become gentle on the environment and human health by 2050. The air traffic of the future will be operated with quieter, low-emission and resource-saving aircraft. Such air traffic is largely sustainable by effectively reducing its environmental impact while meeting the mobility needs of people.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung	15
2 Entwicklung des Luftverkehrs.....	17
2.1 Analyse der bisherigen Verkehrsentwicklung	17
2.1.1 Entwicklung der Fluggastzahlen.....	17
2.1.2 Gründe für das Wachstum	17
2.1.3 Sozioökonomische Aspekte	19
2.1.4 Entwicklung der Luftfracht.....	21
2.2 Zukünftige Verkehrsentwicklung	21
2.2.1 Prognosen der Fluggastzahlen	21
2.2.2 Prognosen der Flugzeugflotte.....	23
2.2.3 Neue Entwicklungen in der Luftfahrzeugtechnik.....	24
3 Aktuelle und zukünftige Umweltbelastungen durch den Luftverkehr	25
3.1 Energieverbrauch	25
3.2 Klimarelevante Emissionen des Luftverkehrs und ihre Auswirkungen.....	26
3.2.1 Klimaeffekte	26
3.2.2 CO ₂ -Emissionen	29
3.2.3 Gesamt-Klimawirkung (CO ₂ - und Nicht-CO ₂ -Effekte).....	31
3.2.4 Langfristige Klimaschutzanforderungen	34
3.3 Luftbelastung und ihre Auswirkungen	38
3.3.1 Luftqualität an deutschen Flughäfen	38
3.3.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.....	40
3.4 Fluglärmbelastung und ihre Auswirkungen	42
3.4.1 Fluglärmbelastung.....	42
3.4.2 Lärmwirkungen	47
3.5 Weitere Umweltbelastungen	51
3.5.1 Flächeninanspruchnahme	51
3.5.2 Ressourcenverbrauch durch den Luftfahrzeugbau.....	52
3.5.3 Auswirkungen auf die Wasser- und Bodenqualität	53
3.5.4 Auswirkungen auf die biologische Vielfalt	54
3.5.5 Wirkung von Treibstoffschnellablass auf Umwelt und Gesundheit	55

4	En Route zu einem umweltschonenden Luftverkehr – Vision des Umweltbundesamtes	57
5	Instrumente und Maßnahmen für einen umweltschonenden Luftverkehr	63
5.1	Instrumente und Maßnahmen auf europäischer und internationaler Handlungsebene	63
5.1.1	Zulassungsanforderungen für Luftfahrzeuge	63
5.1.1.1	Minderung der Geräuschemissionen	63
5.1.1.2	Minderung der Schadstoff- und CO ₂ -Emissionen	66
5.1.1.3	Begrenzung des Tankvolumens zur Vermeidung von Ultra-Langstreckenflügen	69
5.1.1.4	Ziviler Überschall-Luftverkehr	70
5.1.2	Ökonomische Anreize	71
5.1.2.1	Europäischer Emissionshandel (EU-ETS)	71
5.1.2.2	Luftverkehr im EU-ETS	73
5.1.2.3	CORSIA als marktbasierende Klimaschutzmaßnahme der ICAO	77
5.1.2.4	Abbau von Subventionen über eine Weiterentwicklung der Besteuerung	81
5.1.2.5	Gesetzliche Vorgaben zur Preisgestaltung von Umsteigeflügen	83
5.1.3	Einführungsstrategie für postfossile Kraftstoffe	83
5.1.4	Flugroutenmanagement	87
5.1.5	Minderung der Nicht-CO ₂ -Klimaeffekte	88
5.1.6	Übersicht europäischer und internationaler Maßnahmen und Instrumente	90
5.2	Instrumente und Maßnahmen auf nationaler Handlungsebene	92
5.2.1	Flughafenplanung in Deutschland	92
5.2.1.1	Planungsverfahren und Standortentscheidungen für Flughäfen	92
5.2.1.2	Handlungsempfehlungen	94
5.2.2	Ökonomische Anreize	96
5.2.2.1	Abbau von Subventionen über eine Weiterentwicklung der Besteuerung	96
5.2.2.2	Schaffung eines nationalen Innovations- und Demonstrationsfonds Luftverkehr	98
5.2.2.3	Lärm- und schadstoffabhängige Start- und Landeentgelte	99
5.2.2.4	Logistik und Wettbewerb	101
5.2.3	Intermodalität: Anbindung der Flughäfen und Verlagerung von Kurzstreckenflügen ...	104
5.2.3.1	Flughäfen eng an das Schienennetz anbinden	104
5.2.3.2	Faktor Zeit in der Konkurrenz zwischen Luft- und Schienenverkehr	104
5.2.3.3	Verlagerungspotentiale	105
5.2.4	Umweltverträglicher Tourismus	107
5.2.4.1	Charakteristik und Umweltrelevanz des Reisens	107
5.2.4.2	Alternatives Reiseverhalten und Trends	108
5.2.4.3	Kurze Anreisewege und längere Aufenthalte	108

5.2.4.4	Wahl des Verkehrsmittels.....	109
5.2.4.5	Freiwillige CO ₂ -Kompensationen von Flugreisen.....	109
5.2.5	Mobilitätsmanagement	109
5.2.5.1	Definition Mobilitätsmanagement	109
5.2.5.2	Betriebliches Mobilitätsmanagement	110
5.2.5.3	Behördliches Mobilitätsmanagement	110
5.2.5.4	Handlungsfeld Dienstreisen.....	111
5.2.6	Übersicht nationaler Maßnahmen und Instrumente.....	112
5.3	Instrumente und Maßnahmen auf lokaler Handlungsebene.....	115
5.3.1	Lärmkontingentierung	115
5.3.1.1	Bottom-Up- versus Top-Down-Ansatz in der Fluglärminderung.....	115
5.3.1.2	Prinzip und Vorteile der Lärmkontingentierung.....	115
5.3.1.3	Ermittlung der Belastung und Konfliktanalyse	116
5.3.1.4	Regulierung der Zielerreichung.....	116
5.3.1.5	Handlungsmöglichkeiten der Akteure im Konfliktfall.....	117
5.3.1.6	Handlungsempfehlungen.....	118
5.3.2	Lärm mindernde Flugverfahren	118
5.3.2.1	Handlungsansätze und deren Wirkung.....	118
5.3.2.2	Festlegung von Flugverfahren	120
5.3.3	Lärm- und schadstoffmindernde Maßnahmen in der Allgemeinen Luftfahrt	122
5.3.4	Zivile Drohnen	124
5.3.5	Lärm- und schadstoffminderndes Management der Flugbetriebsflächen	126
5.3.5.1	Lärminderung auf dem Flughafengelände	126
5.3.5.2	Schadstoffminderung im Bodenbetrieb	127
5.3.6	Übersicht lokaler Maßnahmen und Instrumente	128
6	Fazit und Ausblick.....	129
7	Glossar	135
8	Quellenverzeichnis	140

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Weltweites Luftverkehrswachstum der letzten 70 Jahre	17
Abbildung 2: Entwicklung der Transport-Kosten im Luftverkehr seit 1995	18
Abbildung 3: Anteile der Energieverbrauchertypen in den sozialen Milieus.....	20
Abbildung 4: Vergleich der Luftverkehrsprognosen bis 2037 bzw. 2050.....	22
Abbildung 5: Wachstum der Verkehrsleistung 2017 bis 2037 in RPK, nach Weltregionen	23
Abbildung 6: Prognosen des weltweiten Kerosinbedarfs bis 2050.....	26
Abbildung 7: Atmosphärische Effekte von Verkehrsemissionen	27
Abbildung 8: CO ₂ -Emissionen des europäischen zivilen Luftverkehrs seit 1990 und Prognosen bis 2040.....	30
Abbildung 9: Strahlungsantrieb (RF) der atmosphärischen Effekte des Luftverkehrs	32
Abbildung 10: Klimawirkung von Hin- und Rückflug pro Person im Vergleich.....	34
Abbildung 11: Eigenschaften globaler Minderungspfade	35
Abbildung 12: Globale CO ₂ -Emissionen verschiedener Szenarien und entsprechende Temperaturverläufe im Vergleich zu CO ₂ -Emissionen des Luftverkehrs	36
Abbildung 13: Entwicklung von CO ₂ -Emissionen und Nicht-CO ₂ -Effekten in einem Szenario mit hohen operativen und technischen Verbesserungen.....	37
Abbildung 14: Luftschadstoffmessungen im Raum Frankfurt (Mittelwerte des Jahres 2018)	39
Abbildung 15: Anzahl der Fluglärm-Betroffenen an den 47 bedeutendsten europäischen Flughäfen mit L _{DEN} -Pegeln von über 55 dB(A) seit 2005 und Prognosen bis 2040	46
Abbildung 16: Subjektive Lärmbelästigung in Deutschland im Jahr 2018: Anteil der Befragten nach Belästigungswirkung	48
Abbildung 17: Luftbildaufnahme des Flughafens Frankfurt/Main, Hervorhebung der Flughafengrenze	51
Abbildung 18: Bausteine der Vision des Umweltbundesamtes für einen umweltschonenden Luftverkehr.....	62
Abbildung 19: Entwicklung der Geräuschemissionen von Verkehrsflugzeugen	65
Abbildung 20: Entwicklung der 57 dB(A)-Konturfläche bei wachsendem Luftverkehr und verschiedenen technologischen Entwicklungen.....	66
Abbildung 21: Entwicklung der NO _x -Grenzwertkurven.....	67
Abbildung 22: NO _x -Ausstoß verschiedener Triebwerke.....	68
Abbildung 23: Kraftstoffverbrauch einer Boeing 777-300 je Passagier und nautischer Meile mit und ohne Zwischenstopp auf halber Flugstrecke	69
Abbildung 24: Preisentwicklung von europäischen Emissionsberechtigungen (EUA) seit 2008.....	73
Abbildung 25: Elemente des „Basket of Measures“ und deren Beitrag zum Carbon Neutral Growth	78

Abbildung 26: Auf die Schiene verlagerbare innerdeutsche und grenzüberschreitende Kurzstreckenflüge 106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gruppen typischer Luftfrachtgüter 21

Tabelle 2: Fluglärm-Betroffene an Großflughäfen in Deutschland 2017 nach EU-Umgebungslärmrichtlinie..... 43

Tabelle 3: Entwicklung der Fluglärm-Betroffenzahlen an Großflughäfen in Deutschland 2017 zu 2012 nach EU-Umgebungslärmrichtlinie 44

Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung der Krankheitslasten durch Fluglärm..... 50

Tabelle 5: Kerosinverbrauch einer Boeing 787-9 auf zwei Langstreckenflügen 70

Tabelle 6: Ziele und Zielwerte des EU-ETS für den Luftverkehr 73

Tabelle 7: Übersicht über Zuteilungs- und Abgabemengen für den Luftverkehr 74

Tabelle 8: Geltungsbereich von EU-ETS und CORSIA für verschiedene Kategorien von Flügen 79

Tabelle 9: Zusammenstellung europäischer und internationaler Maßnahmen und Instrumente 90

Tabelle 10: Zusammenstellung nationaler Maßnahmen und Instrumente 113

Tabelle 11: Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren im LTO-Zyklus..... 123

Tabelle 12: Zusammenstellung lokaler Maßnahmen und Instrumente 128

Abkürzungsverzeichnis

ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
ADF	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmkommissionen
AFFF	Aqueous Film Forming Foam
AGWP	Absolute Global Warming Potential
APU	Auxiliary Power Unit
ATR	Average Temperature Response
AzB	Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen
BAF	Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung
BA-FVD	Betriebsanweisung der Deutschen Flugsicherung für den Flugverkehrsdienst
BER	Flughafen Berlin Brandenburg
BHO	Bundeshaushaltsordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz (Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BRKG	Bundesreisekostengesetz
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CDM	Clean Development Mechanism
CDO	Continuous Decent Operations
COPD	Chronic Obstructive Pulmonary Disease
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
DALY	Disability-Adjusted Life Years
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
Difu	Deutsches Institut für Urbanistik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECAA	European Common Aviation Area
EASA	European Aviation Safety Agency
EHRL	EG-Emissionshandels-Richtlinie
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EPNL	Effective Perceived Noise Level
EU	Europäische Union
EUA	European Emission Allowances
EU-ETS	Europäisches Emissionshandelssystem
EWf	Emission Weighting Factor
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum

FAB	Functional Airspace Blocks
FABEC	FAB Europe Central
FFFP	Filmbildende Fluor-Proteinschaummittel
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FLK	Fluglärmkommission
ft	Feet, 1 ft = 0,3048 m
GBAS	Ground Based Augmentation System
GRW	Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur“
GUAN	German Ultrafine Aerosol Network
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICD	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems
IEP	Independent Experts Panel der ICAO
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
ICTT	International Council on Clean Transportation
kt	Knoten (NM/h), 1 kt = 1,852 km/h
$L_{Aeq, Nacht}$	Mittelungspegel für die Geräuschbelastung in der Nacht [dB(A)]
$L_{Aeq, Tag}$	Mittelungspegel für die Geräuschbelastung am Tage [dB(A)]
LCA	Life Cycle Analysis
L_{DEN}	Tag-Abend-Nacht-Lärmindeks der EU-Umgebungslärmrichtlinie [dB(A)]
LTO	Landing and Take-Off Cycle der ICAO
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
LuftVO	Luftverkehrs-Ordnung
LuftVStG	Luftverkehrssteuergesetz
LuftVZO	Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung
NASA	National Aeronautics and Space Administration
MEW	Manufacturer's Empty Weight
MSR	Marktstabilitätsreserve
MTOM	Maximum Take-off Mass
NM	Nautical Mile, 1 NM = 1852 m
NORAH	Noise-Related Annoyance, Cognition and Health
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PFC	poly- und perfluorierte Chemikalien
Pkm	Personenkilometer
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid

RANCH	Road traffic and Aircraft Noise Exposure and Children's Cognition
ROG	Raumordnungsgesetz
RPK	Revenue Passenger Kilometers
SAR	Specific Air Range
SARPs	Standard And Recommended Practices
SES	Single European Sky
SLE	Start- und Landeentgelte
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
TREMOD	Transport Emission Model
UAV	unmanned arial vehicle (Drohne)
UBA	Umweltbundesamt
UFP	Ultrafeine Partikel
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WHO	World Health Organization
YLD	Years Lived with Disability
YLL	Years of Life Lost (due to premature death)

1 Einleitung

Mobilität ist eine wichtige Voraussetzung für gesellschaftliche Entwicklung und Partizipation, Handelsbeziehungen, Beschäftigung und Wohlstand. Leistungsfähige und zugleich umweltschonende Verkehrssysteme sind deshalb von zentraler Bedeutung. Der Luftverkehr gehört zu den global am stärksten wachsenden Verkehrsarten und hat in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zugenommen. Weltweit wurden 2018 4,3 Milliarden Passagiere befördert.

Verkehrsleistungsprognosen auf Basis des bisherigen Regulierungsrahmens gehen für die nächsten beiden Jahrzehnte von einer jährlichen Zunahme des internationalen Luftverkehrs um mehr als 4 % aus. Die Vielzahl der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen, die vor allem durch Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie Lärm verursacht werden, stellt den Luftverkehr vor enorme ökologische Herausforderungen. Diesen wird durch eine Vielzahl von Aktivitäten und Maßnahmen der Luftfahrtbranche und Politik begegnet. So konnten durch zahlreiche Entwicklungen bei den Triebwerken, der Luftfahrzeugkonstruktion und der Navigation, aber auch bei An- und Abflugverfahren die Energieeffizienz gesteigert und die Lärmimmissionen einzelner Flüge verringert werden. Für die Senkung und Kompensation der CO₂-Emissionen sind die Integration des Luftverkehrs in den europäischen Emissionshandel sowie das globale Offsetting-System CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) wichtige Schritte.

Die bisherigen Anstrengungen werden den ökologischen Herausforderungen und den gesetzten Klima- und Umweltschutzziele jedoch nicht gerecht. Das Festhalten an fossilen Kraftstoffen im Luftverkehr ist bei Berücksichtigung externer Kosten mittel- und langfristig weder ökologisch noch volkswirtschaftlich zweckmäßig. Die Energie- und Kraftstoffkosten betragen schon heute rund ein Drittel der Kosten. Sie werden bei zunehmend umweltgerechterer Bepreisung (d. h. unter Berücksichtigung bisher ungedeckter Umwelt- und Gesundheitskosten) weiter steigen, sodass alternative umweltschonende Kraftstoffe auch von betriebswirtschaftlicher Relevanz sein werden. Um den Luftverkehr zukünftig umweltschonend zu gestalten, ist ein umfassender konzeptioneller Ansatz erforderlich – auf internationaler, nationaler und lokaler Ebene. In technischer Hinsicht sind Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, Lärminderung, Begrenzung der spezifischen Emissionen sowie zur Verminderung der Klimawirkung des Luftverkehrs unter anderem durch die Einführung eines postfossilen, erneuerbaren Kraftstoffs wichtig. Im Hinblick auf nahezu exponentiell steigende Passagierzahlen (RPK) ist aber auch grundlegend abzuwägen, wieviel Luftverkehr notwendig und zu welchen Kosten für Mensch und Umwelt tragbar ist. Es ist an der Zeit eine Verkehrswende einzuleiten, die auch auf eine Trendwende in unserem Lebensstil und Konsumverhalten baut, sowie eine Energiewende im Luftverkehr voranzutreiben.

Die vorliegende Studie des Umweltbundesamtes (UBA) beschreibt eine Gesamtstrategie für einen umweltschonenden Luftverkehr bis zum Jahr 2050. Die Maßnahmen dieser Strategie sind vor allem auf den zivilen Linien-, Charter und Luftfrachtverkehr ausgerichtet, weil dieser für den Hauptteil der Umweltbelastungen des Luftverkehrs verantwortlich ist. Am Rande wird auch die sogenannte Allgemeine Luftfahrt betrachtet, bei der es sich vor allem um nichtgewerbliche Flüge mit kleineren Propellerflugzeugen oder Hubschraubern handelt. Synergien, aber auch auftretende Zielkonflikte machen es notwendig, die bisher vorliegenden Erkenntnisse sowie relevante Umweltschutzinstrumente und -maßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt ganzheitlich zu betrachten.

In der vorliegenden Studie wird zunächst die bisherige und zukünftige Entwicklung des Luftverkehrs dargestellt (Kapitel 2). Anschließend werden der aktuelle Stand sowie die zukünftigen Entwicklungen der Umweltbelastungen durch den Luftverkehr bewertet (Kapitel 3). Dabei wird auf die Treibhausgasemissionen sowie die Nicht-CO₂-Effekte eingegangen und die Klimawirkung des Luftverkehrs quantifiziert. Zudem wird die Luftqualität an Flughäfen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit beurteilt. Ebenso werden sowohl die Auswirkungen des Fluglärms auf den Men-

schen als auch die Auswirkungen des Luftverkehrs auf den Ressourcen- und Flächenverbrauch untersucht.

Auf dieser Grundlage wird eine Vision für einen umweltschonenden Luftverkehr 2050 entwickelt, die umwelt- und verkehrspolitische Ziele für den mittelfristigen (2030) und langfristigen (2050) Zeithorizont definiert (Kapitel 4).

Anschließend werden detaillierte Maßnahmenpakete vorgestellt, die aufzeigen, wie die Vision eines umweltschonenden Luftverkehrs 2050 Realität werden kann (Kapitel 5). Hierbei wird nach Maßnahmen und Instrumenten auf internationaler, europäischer, nationaler und lokaler Ebene unterschieden. Aufgrund der komplexen globalen Struktur des Luftverkehrs sind Aktivitäten auf internationaler Ebene von besonderer Bedeutung. Wenn möglich, sollten Maßnahmen und Instrumente daher international umgesetzt werden. Die Vergangenheit zeigt, dass es aber auch sinnvoll sein kann, national oder europäisch beim Umwelt- und Klimaschutz im Luftverkehr voranzugehen. Es wird aufgezeigt, dass vielfältige Bausteine für einen umweltschonenden Luftverkehr auf allen Ebenen existieren, um die Umweltauswirkungen des Luftverkehrs wirksam und rasch zu mindern. Allerdings setzt dies schnelles Handeln – bereits heute – voraus.

Abschließend zieht diese Studie ein Fazit auf Basis der empfohlenen Maßnahmen und gibt einen Ausblick auf den Luftverkehr in den Jahren 2030 und 2050 (Kapitel 6).

2 Entwicklung des Luftverkehrs

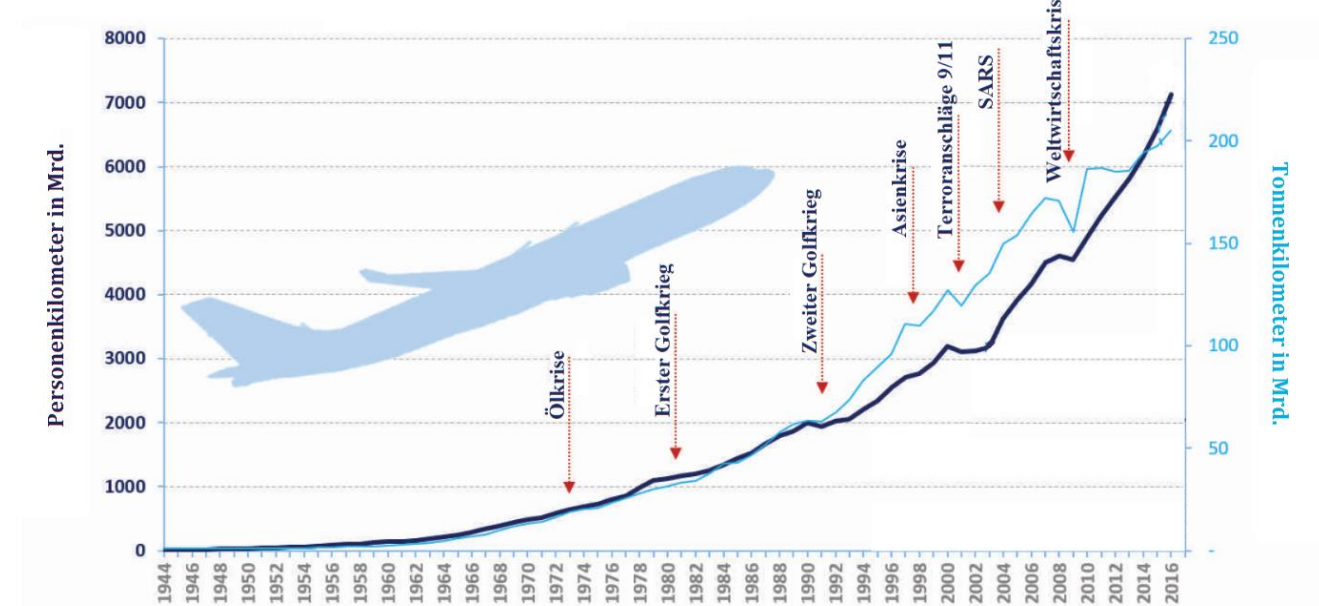
2.1 Analyse der bisherigen Verkehrsentwicklung

2.1.1 Entwicklung der Fluggastzahlen

Der weltweite Luftverkehr hat in den vergangenen Jahrzehnten stetig zugenommen. 2018 wurden mit 4,3 Mrd. Passagieren weltweit so viele Menschen befördert wie nie zuvor (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2019). Ausgehend von den rund 2 Mrd. Passagieren, die zu Beginn der 1990er Jahre noch pro Jahr abgefertigt wurden, ist der Luftverkehr damit um mehr als 100 % gewachsen. 2018 wuchs der weltweite Passagierluftverkehr um 6,7 % Revenue Passenger Kilometers (RPK)¹ (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2019), ähnlich verhält es sich in Europa: die Anzahl der Passagiere stieg um 6,1% (Airports Council International Europe (ACI Europe), 2019). Allein in Deutschland hat sich die Zahl der Fluggäste (sowohl Einsteiger als auch Aussteiger) von 77 Mio. im Jahr 1991 (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV), 1991) auf 244 Mio. im Jahr 2018 verdreifacht (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV), 2018).

Zwar gab es seit Beginn der Luftfahrt vereinzelte Stagnationsphasen – wie zuletzt bei der Weltwirtschaftskrise 2008. Der Luftverkehr hat sich aber stets binnen kurzer Zeit erholt und danach sein Wachstum fortgesetzt (Abbildung 1).

Abbildung 1: Weltweites Luftverkehrswachstum der letzten 70 Jahre



Quelle: (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2017a)

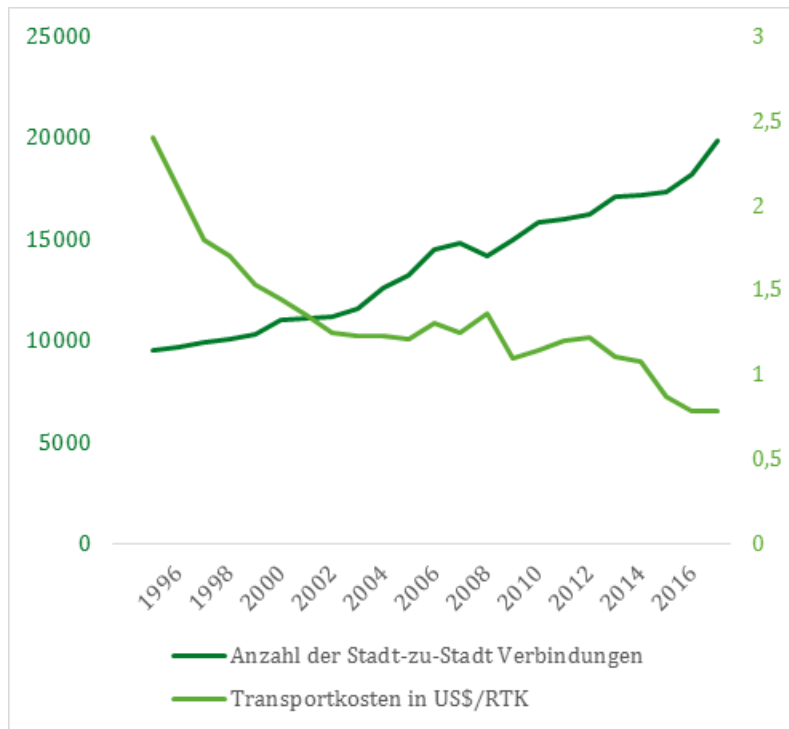
2.1.2 Gründe für das Wachstum

Das bisherige Wachstum des Luftverkehrs hat viele Ursachen. Auf der Angebotsseite nehmen die sinkenden Kosten in den vergangenen 50 Jahren eine herausragende Stellung ein. Für Fluggesellschaften verbilligten sich Produktionsfaktoren, wie der Kerosinpreis, in den letzten zwanzig Jahren um mehr als die Hälfte (Abbildung 2). Auch Lohnkosten sowie Beschaffungs- und Instandhal-

¹ Die Revenue Passenger Kilometers bezeichnen das Produkt der beförderten Personen und der zurückgelegten Entfernung in Kilometern.

tungskosten der Luftfahrzeuge sanken. Unterstützt wurde diese Entwicklung durch zunehmende Treibstoffeffizienz, steigende Auslastung und eine bessere operative Performance der Luftfahrzeuge sowie höhere Arbeitsproduktivität, insbesondere durch Auslagern von Dienstleistungen und der Bildung von Airline-Allianzen.

Abbildung 2: Entwicklung der Transport-Kosten im Luftverkehr seit 1995



Quelle: eigene Darstellung nach (International Air Transport Association, 2018)

Besonders günstige Ticketpreise bieten die sogenannten Low Cost Carrier an, vor allem im Kurz- und Mittelstreckenbereich. Ermöglicht werden diese u. a. durch rigide Einsparungen bei den Personalkosten. So sind Piloten und Kabinenpersonal überwiegend durch Personalagenturen beschäftigt – Low Cost Carrier sparen sich so Sozialversicherungsbeiträge. Auch niedrige Tarifabschlüsse, minimaler Personaleinsatz und Ausschöpfung der Arbeitszeiten drücken die Personalkosten auf ein Minimum.

Mit diesen Kostensenkungen und der damit steigenden Nachfrage gingen ein deutlicher Ausbau der Luftverkehrsinfrastruktur und eine Steigerung der Konnektivität einher. Die Zahl der Stadt-zu-Stadt-Verbindungen hat sich in den letzten zwanzig Jahren mehr als verdoppelt (Abbildung 2). Im Bereich der Privat- und Geschäftsreisen wurden zudem die Beherbergungs-, Freizeit- und Versorgungsinfrastrukturen weltweit deutlich ausgebaut. Es etablierten sich Anbieter, Geschäftsmodelle und Märkte. Weltweite Flugverbindungen ermöglichen zudem rasche und direkte Geschäftskontakte. Außerdem veränderten sich in vielen Ländern politische Rahmenbedingungen und Visa-Bestimmungen, was die Nutzung des Luftverkehrs für einen Teil der Menschheit zusätzlich vereinfachte.

Ein ebenso differenziertes Bild ergibt sich auf der Nachfrageseite. Zum einen hat der Tourismus entscheidend zu einem wachsenden Passagieraufkommen beigetragen. Empirisch nachweisbar ist eine steigende Präferenz für weiter entfernte Reiseziele (Peeters, 2017). Als mögliche Ursachen gelten die – teils gesellschaftlich geprägten – Erwartungen von Reisenden, dass weiter entfernte Ziele sie glücklicher machen (Ram et al., 2013) sowie der Wunsch nach Statusgewinn durch zurückgelegte Entfernung (Pappas, 2014). Die Wahl eines weiter entfernten Reiseziels korreliert stark mit der Entscheidung für das Flugzeug als Verkehrsmittel (Schmied et al., 2009).

Zudem korrelieren empirisch die Häufigkeit des Reisens und die Schnelligkeit des gewählten Transportmittels bis zu einer bestimmten Grenze mit dem Einkommen der Reisenden (Peeters, 2017); (Schulz et al., 2014). Wachsender materieller Wohlstand geht daher statistisch einher mit einer stärkeren Reisetätigkeit per Flugzeug, was sich beispielsweise deutlich in den Mittelschichten der Wachstumsmärkte zeigt, z. B. Indien und China. Verschiedene kulturelle Differenzen innerhalb und zwischen Gesellschaften lassen jedoch große Unterschiede in der Reiseintensität, den Reisemotiven und damit auch der Häufigkeit der Nutzung des Flugzeugs zu. Wichtige soziodemographische Faktoren, die positiv mit der Reiseintensität korrelieren, sind zudem die verfügbare Zeit der Reisenden, ihr Alter, ihr Bildungsniveau sowie die Existenz von Verwandten im Ausland bzw. in weiter Entfernung (Schulz et al., 2014); (Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen e.V (FUR). 2018).

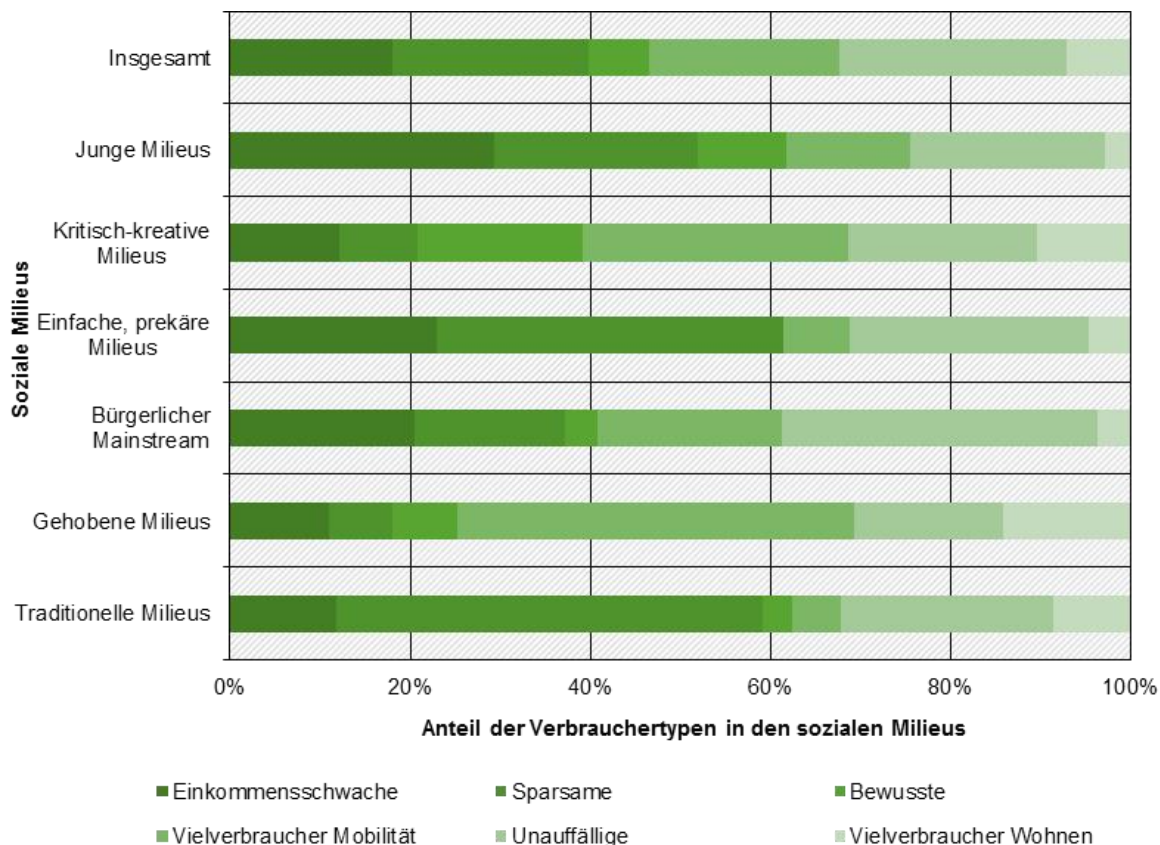
2.1.3 Sozioökonomische Aspekte

In Deutschland – wie auch in anderen europäischen Staaten – hat das steigende Angebot von kostengünstigen Flugverbindungen im Kurz- und Mittelstreckenbereich Flugreisen für eine breite Bevölkerungsschicht erschwinglich gemacht und stimuliert zunehmend den Tourismus im unteren Preissegment. Low Cost Carrier haben zu einem geänderten Nachfrageverhalten beigetragen: Der Zweck des Reisens konzentriert sich weniger auf das Ziel, sondern zunehmend auf das „Reisen um des Reisens willen“.

Bei tiefergehender sozioökonomischer Analyse des Flugreiseverhaltens ergeben sich weitere interessante Differenzierungen. Eine repräsentative Erhebung von Pro-Kopf-Verbräuchen natürlicher Ressourcen in Deutschland nach Bevölkerungsgruppen ergab, dass das Reiseverhalten positiv mit dem Einkommen korreliert und insbesondere gehobene sowie kritisch-kreative Milieus im Bereich Mobilität hohe Energieverbräuche und damit einhergehende CO₂-Emissionen aufweisen („Vielverbraucher Mobilität“ in Abbildung 3). Neben der Nutzung größerer Autos sind Flugreisen hierfür die Hauptursache (Kleinhückelkotten et al., 2016). Konkret ist festzustellen, dass in Deutschland im Jahr 2018 ca. 50 % aller Urlaubsreisen² mit dem Flugzeug von Personen aus Haushalten mit einem Netto-Einkommen von über 3.000 € durchgeführt wurden (Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen e.V (FUR). 2018).

² Die FUR-Reiseanalyse betrachtet vor allem private Urlaubsreisen und damit eine Dauer von über vier Tagen, also die klassischen Jahresurlaube mit einer Dauer von ein bis zwei Wochen. Bei dem Blick auf die sozialen Auswirkungen von Umweltschutzmaßnahmen im Luftverkehr sind besonders diese Urlaubsreisen von Interesse, wohingegen Wochenend-Flugreisen eindeutig kritisch zu betrachten sind (Sausen et al., 2017).

Abbildung 3: Anteile der Energieverbrauchertypen in den sozialen Milieus



Quelle: (Kleinhüchelkotten et al., 2016)

Zur Differenzierung nach Haushaltstypen ist des Weiteren festzustellen, dass Familien vergleichsweise wenig fliegen. Bei nur knapp 15 % der Urlaubsreisen im Jahr 2018 hatten Familien mit mindestens einem Kind im Alter bis 13 Jahre das Flugzeug benutzt. Der Anteil der Alleinerziehenden mit mindestens einem Kind bis 13 Jahre an den Urlaubsflügen im Jahr 2018 liegt unter 1 %. Annähernd die Hälfte aller Urlaubsflüge im Jahr 2018 wurde von Singles (ohne Partner und Kind) im Alter von 14 bis 59 Jahren durchgeführt (Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen e.V (FUR). 2018).

Deutlich ist auch der Unterschied zwischen Geschäfts- und Urlaubsreisen³, was die Flughäufigkeit betrifft. Im Jahr 2018 sind ca. 60 % der Geschäftsreisenden aus Deutschland mindestens viermal im Jahr auf Dienstreise geflogen⁴; davon die Hälfte elfmal oder mehr. Der Anteil der Urlaubsreisenden mit mindestens vier Flugreisen im Jahr lag 2018 bei 0,2 %; wohingegen ca. 77 % dieser Gruppe nur einmal im Jahr 2018 eine Urlaubsreise mit dem Flugzeug unternommen haben (Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen e.V., 2018).

Im Durchschnitt führt jeder Bundesbürger pro Jahr ca. 0,45 Privatreisen sowie 0,22 Geschäftsreisen mit dem Flugzeug durch (Burger, 2018). Aus den vorangegangenen Ausführungen wird jedoch deutlich, dass dieser Durchschnittswert durch eine sehr ungleich verteilte Nutzung des Flugzeug in den Gesellschaftsgruppen geprägt ist. Bei einer Verteuerung von Urlaubsflügen sind also dramatische soziale Effekte nur begrenzt zu befürchten, weil sozioökonomisch schwächere Zielgruppen bei Urlaubsreisen ohnehin seltener das Flugzeug benutzen.

³ Eine Flugreise beinhaltet einen Hin- und Rückflug.

⁴ Diese Angaben betreffen nur die Dienstreisen mit mindestens einer Übernachtung. Eintägige Dienstreisen mit dem Flugzeug sind noch deutlich häufiger – absolut betrachtet sowie im Verhältnis zu eintägigen privaten Flugreisen.

2.1.4 Entwicklung der Luftfracht

Auch das Luftfrachtaufkommen verzeichnet hohe Wachstumszahlen: Gegenüber 1991 (1,4 Mio. t) ist die jährliche Frachtmenge bis 2017 in Deutschland um 243 % auf 4,9 Mio. t gestiegen (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV), 1991); (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV), 2018). Im Zusammenhang mit vielen weiteren Faktoren waren dafür unter anderem das weltweite Wirtschaftswachstum sowie die sich differenzierenden Lieferketten und Wertschöpfungsstufen in der Weltwirtschaft ursächlich. Damit stieg die räumliche Distanz der Arbeitsteilung an (Helmreich et al., 2010). Die Preise für Luftfracht liegen jedoch etwa vier- bis fünf-mal höher als der Gütertransport auf der Straße und 12- bis 16-mal höher als der Transport zur See (The World Bank Group (WBG), 2009). Daher müssen Güter eine hohe Dringlichkeit und/oder hohe Stückkosten, wie in Tabelle 1 dargestellt, besitzen, um sie rentabel per Luftfracht zu transportieren (The World Bank Group (WBG), 2009).

Tabelle 1: Gruppen typischer Luftfrachtgüter

Art	Eigenschaften	Beispiele
Kapitalintensive Güter	Hoher Wert im Vergleich zu Gewicht bzw. Größe	Mikroelektronik, Medizintechnik, Investitionsgüter, Computer, Fotoausrüstung
Temperatursensible Güter	Leicht verderbliche Waren bzw. erhöhte Überwachung notwendig	Frische Lebensmittel, Tiefkühlkost, Blumen, Pharmazeutika, fotografische Materialien, lebende Tiere
Termingebundene Sendungen Produkte mit kurzem Lebenszyklus Notfalllieferungen	Modeprodukte	Ersatzteile, Luftpost Kleidung, Schuhe, technische Kleingeräte Produktionsengpässe, Krisensituationen

Quelle: (Verbraucherzentrale, 2010)

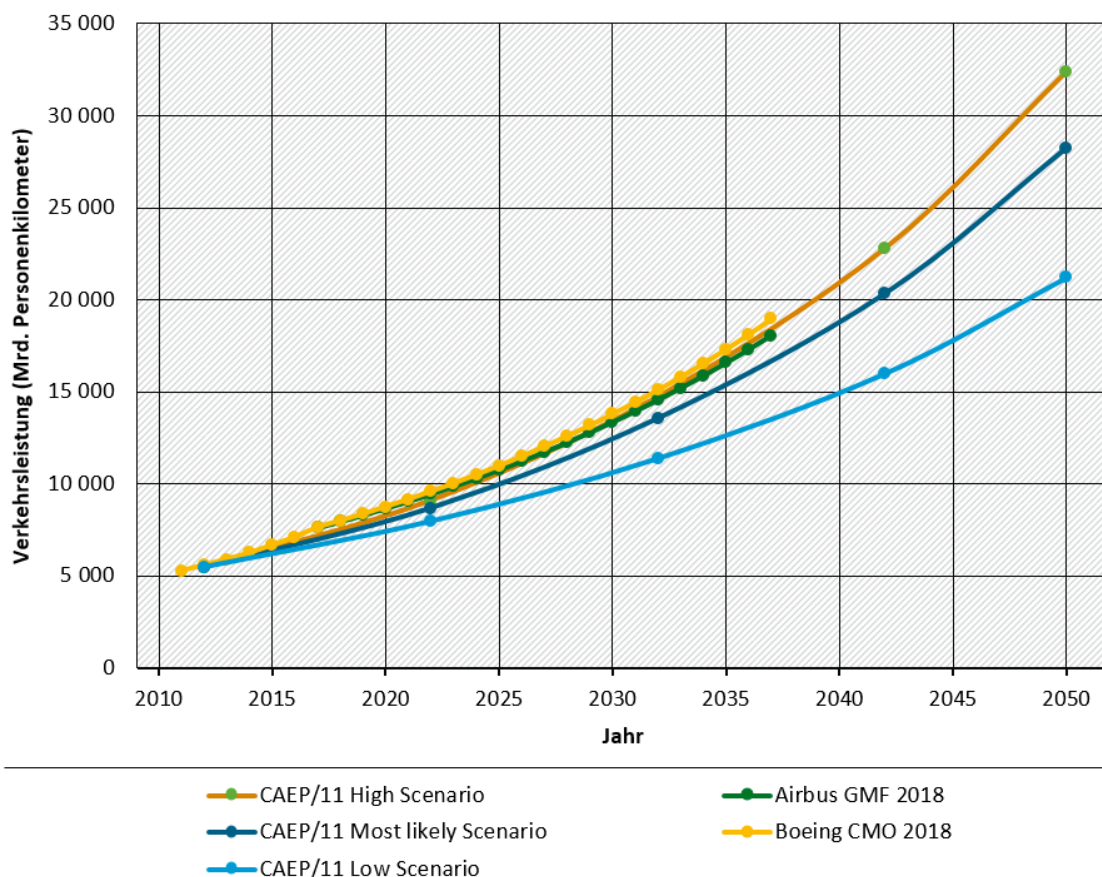
Aus dem Wachstum der Frachtverkehrsnachfrage lässt sich ableiten, dass der Bedarf von Firmen und Konsumenten nach diesen Produkten und nach kurzen Lieferzeiten in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat. Für die deutsche Volkswirtschaft gilt, dass 27 % des Handelswertes aller ein- bzw. ausgeführten Güter per Flugzeug transportiert werden (Statistisches Bundesamt, 2019a) (Statistisches Bundesamt, 2019b).

2.2 Zukünftige Verkehrsentwicklung

2.2.1 Prognosen der Fluggastzahlen

Die starke Zunahme des Luftverkehrs in der Vergangenheit wird sich nach einschlägigen Vorhersagen auch zukünftig fortsetzen. Dies zeigen beispielsweise aktuelle Prognosen der Luftfahrzeughersteller Airbus und Boeing. Diese entsprechen ungefähr dem Szenario der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation ICAO, das in einer wirtschaftlich florierenden Welt ein Wachstum der Passagierkilometer (RPK) von 4,8 % pro Jahr erwartet („CAEP/11 High Scenario“ in Abbildung 4). Selbst für ihr Szenario mit geringem Wirtschaftswachstum („CAEP/11 Low Scenario“) geht die ICAO immer noch von jährlich 3,6 % Zunahme aus (Cames et al., 2019). Gemäß dem „Most likely Scenario“, also dem von der ICAO als am wahrscheinlichsten angesehenen Szenario, wachsen die RPK um 4,4 % pro Jahr, womit sich die Verkehrsleistung etwa alle 16 Jahre verdoppeln würde.

Abbildung 4: Vergleich der Luftverkehrsprognosen bis 2037 bzw. 2050

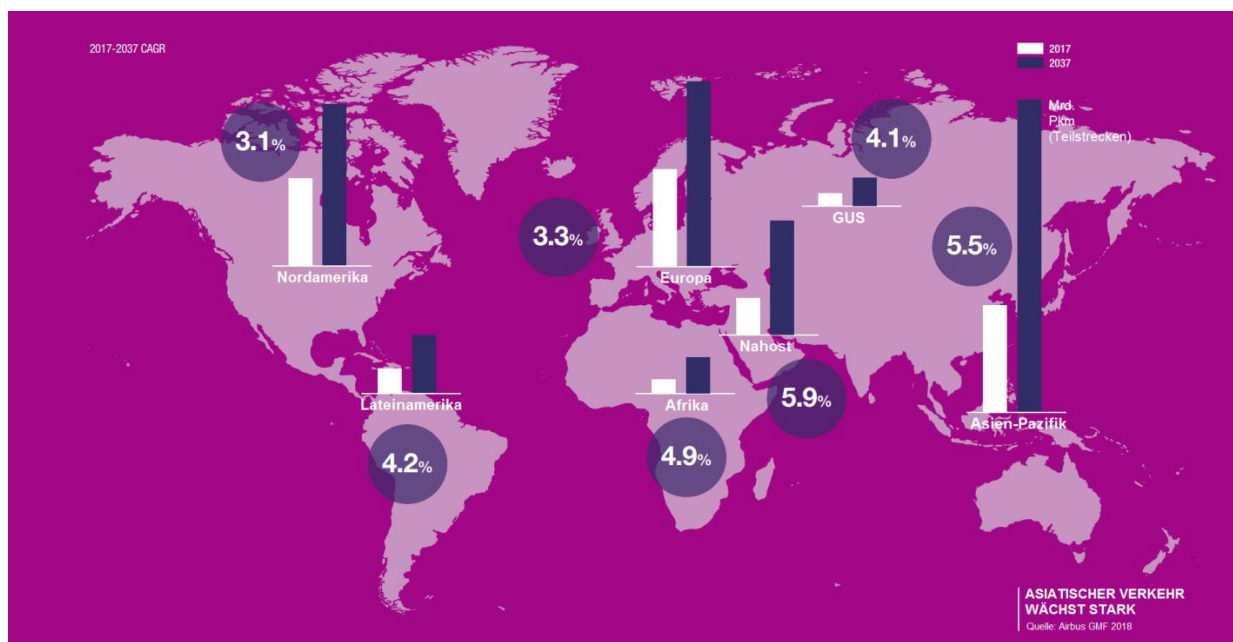


Quelle: (Cames et al., 2019)

Das Wachstum der Verkehrsleistung verteilt sich ungleichmäßig auf die Weltregionen. Relativ hohe Wachstumsraten sind gemäß (Airbus, 2018) für Asien (5,5 %/a) und den Mittleren Osten (5,9 %/a) zu erwarten (Abbildung 5). Die historisch verkehrsstärksten Regionen Europa und Nordamerika werden dagegen nur um gut 3 % pro Jahr wachsen. Diese Aussagen ähneln denen des Boeing Commercial Market Outlook (Boeing, 2018).

Für die Anzahl der Flugbewegungen von und zu Flugplätzen der EU- und EFTA-Staaten wird im European Aviation Environmental Report 2019 der EASA (European Aviation Safety Agency (EASA) et al., 2019) von einer jährliche Zunahme von 1,54 % bis 2040 ausgegangen (wahrscheinlichstes Szenario).

Abbildung 5: Wachstum der Verkehrsleistung 2017 bis 2037 in RPK, nach Weltregionen



Quelle: (Airbus, 2018)

Für Deutschland wird nach Analysen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) eine Zunahme der Passagierzahlen von 3,3 % pro Jahr bis 2030 angenommen. Während es im Jahr 2014 rund 105 Mio. Passagiere (nur Einsteiger) gab, prognostizierte das DLR für 2030 175 Mio. Passagiere (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2015b).

Der rein innerdeutsche Luftverkehr⁵ wächst langsamer. In der 2020er-Dekade nimmt die Verkehrsleistung demnach nur leicht von 10,7 Mrd. Personenkilometer (RPK) auf ca. 12,4 Mrd. RPK zu – also um 1,47 % pro Jahr (BVU/Intraplan et al., 2014). Sie wird voraussichtlich allmählich einen Sättigungspunkt erreichen. Das Aufkommen an zugeladener Fracht in Deutschland steigt laut DLR im Zeitraum von 2014 bis 2030 von 2,3 Mio. t auf 7,3 Mio. t, was einem jährlichen Wachstum von 7,5 % entspricht (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2015b).

2.2.2 Prognosen der Flugzeugflotte

Als Folge der Zunahme des Personen- und Frachtverkehrs werden zukünftig deutlich mehr Luftfahrzeuge benötigt; Airbus schätzt eine Verdopplung der globalen Flotte bis 2036 (Airbus, 2018). Von der Anfang 2017 eingesetzten globalen Flugzeugflotte⁶ werden 20 Jahre später nur noch ein Drittel in Betrieb sein, hingegen werden ca. 34.000 Flugzeuge – also fast doppelt so viele wie die aktuell betriebenen – im selben Zeitraum neu hinzu kommen.

Das bisher starke und auch weiterhin für die nächsten Dekaden prognostizierte beständige Wachstum des Personen- und Frachtverkehrs bringt somit viele Herausforderungen mit sich. Neben steigenden Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen führt dieses Wachstum auch zu einem erhöhten Bedarf an Flughafeninfrastruktur und Ressourcen sowie aller Voraussicht nach zu zunehmender Lärmbelastung. Wenn mit neuen, deutlich effizienteren und lärmarmen Flugzeugen bis 2050 die Treibhausgas-, Schadstoff- und Lärmemissionen wirkungsvoll reduziert werden sollen, müssten diese jetzt in den Markt eingeführt werden.

⁵ 5 Flüge mit Start und Landung in Deutschland.

⁶ 6 Flugzeuge mit mehr als 100 Sitzen.

2.2.3 Neue Entwicklungen in der Luftfahrzeugtechnik

Der hier im Fokus stehende gewerbliche Linien- und Charterluftverkehr wurde in den letzten Dekaden fast ausschließlich mit kerosinbetriebenen Strahltriebwerken-Flugzeugen mit ca. 100 bis 500 Sitzplätzen abgewickelt. Aktuell zeichnen sich jedoch neue Antriebstechnologien ab, die in Zukunft deutlich an Bedeutung gewinnen könnten.

So wird zum einen die Möglichkeit elektrischer Propellerantriebe für Flugzeuge diskutiert. Aufgrund der geringeren Energiedichte derzeitiger Batteriespeicher gegenüber Kerosin und der damit verbundenen schweren Luftfahrzeuge sind diese für den Mittel- und Langstreckenverkehr jedoch in absehbarer Zeit ungeeignet; für den Kurzstreckenverkehr befinden sie sich aktuell noch in einer frühen Entwicklungsphase. Der elektrische Ce-Liner – ein theoretisches Konzept des Bauhauses Luftfahrt für 189 Passagiere und mit ca. 1700 km Reichweite – benötigt für seine Realisierung Batterien mit einer Speicherdichte von mindestens 2 kWh/kg (Hornung et al., 2013). Die Energiedichte heutiger Batterien beträgt aber nur etwa ein Zehntel (Thielmann et al., 2012). Anstelle von vollelektrischen Flugzeugen sind daher zunächst Hybride zu erwarten, die nur einen Teil der Antriebsenergie elektrisch erzeugen. Eine weitere Marktdurchdringung von vollelektrischen Antrieben erscheint derzeit am wahrscheinlichsten für Kleinflugzeuge, die auf Kurzstrecken eingesetzt werden können (Abschnitt 5.3.3). Erste elektrische Kleinflugzeuge sind bereits heute im Einsatz bzw. in der Entwicklung (Rajagopalan Srilatha, 2012). Hinzu kommen so genannte Lufttaxis und Drohnen (Abschnitt 5.3.4).

Darüber hinaus ist zu erwarten, dass in Zukunft gewerbliche Flüge auch mit höheren Flugeschwindigkeiten und damit kürzen Flugzeiten als bisher angeboten werden. Gegenwärtig wird der zivile Luftverkehr mit Flugzeugen durchgeführt, die im Unterschallbereich fliegen, d. h. mit einer Geschwindigkeit kleiner als Mach 1 (ca. 1090 km/h). Zukünftig sollen wieder Business Jets und manche Verkehrsflugzeuge, wie einst die Concorde, mit Überschallgeschwindigkeit fliegen. So werden derzeit insbesondere in den USA und Japan zivile Überschallflugzeuge entwickelt (Maglieri et al., 2014), die etwa ab 2026 regelmäßig verkehren könnten (Abschnitt 5.1.1.4).

3 Aktuelle und zukünftige Umweltbelastungen durch den Luftverkehr

An den derzeitigen globalen wie lokalen Umweltproblemen hat der Luftverkehr einen erheblichen Anteil. Startende und landende Luftfahrzeuge verursachen Lärmbelastungen, die die Gesundheit der Flughafenanwohnerinnen und -anwohner beeinträchtigen und ihre Lebensqualität mindern. Auch die Luftqualität im Flughafenumfeld wird durch Luftschadstoffemissionen der Luftfahrzeuge beeinflusst. Zur Luftbelastung tragen außerdem der landgebundene Zubringerverkehr, flughafeninterne Verkehre sowie mobile und stationäre Anlagen auf dem Flughafen bei. Beim Reiseflug stoßen insbesondere Flugzeuge mit Strahltriebwerken große Mengen an Treibhausgasen aus, die in höheren Luftschichten zu einer zusätzlichen Treibhauswirkung, z. B. durch Wolkenbildungseffekte, führen. Diese Umweltprobleme nehmen vor allem aufgrund des prognostizierten starken Wachstums des Luftverkehrs – keine zusätzlichen Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen unterstellt – in Zukunft noch zu. In den nachfolgenden Kapiteln werden die verschiedenen Umweltwirkungen des Luftverkehrs betrachtet und in ihrem aktuellen sowie zukünftigen Ausmaß eingeordnet und bewertet.

3.1 Energieverbrauch

Flugzeuge wurden und werden, bezogen auf die spezifische Verkehrsleistung, energieeffizienter. Die jährliche Effizienzsteigerung der globalen Flotte lag zwischen 2000 und 2010 bei rund 1,9 % und reduzierte sich in der laufenden Dekade auf rund 0,9 %. Für die folgende Dekade sind weltweit im Durchschnitt 1,4 % pro Jahr prognostiziert (Cames et al. 2019)⁷. Die Lufthansa prognostiziert für ihre Konzernflotte aufgrund der geplanten Flottenmodernisierungen im Zeitraum von 2016 bis 2035 eine Reduktion des spezifischen Kerosinverbrauchs pro Personenkilometer von rund 1 % pro Jahr (Nittinger, 2018). Der prognostizierte Anstieg der Verkehrsleistung (Abschnitt 2.2.1) kann also durch Effizienzsteigerungen der Flugzeugflotten nicht kompensiert werden, sodass der Kerosinverbrauch und somit der Endenergiebedarf des Luftverkehrs wie in der Vergangenheit auch in Zukunft weiter steigen wird.

In Deutschland haben sich die für nationale wie auch internationale Flüge getankten Kerosinmengen von 4,53 Mio. t im Jahr 1990 auf 9,93 Mio. t im Jahr 2017 mehr als verdoppelt⁸. Das Wachstum wird ausschließlich durch den grenzüberschreitenden Luftverkehr verursacht. Auf inländischen Strecken nahm im gleichen Zeitraum der Kerosinverbrauch sogar leicht von 0,66 Mio. t auf 0,65 Mio. t ab (Strogies und Gniffke, 2019). Global ist der Kerosinverbrauch des Luftverkehrs von 161 Mio. t im Jahr 1990 auf 278 Mio. t im Jahr 2015 angestiegen – das entspricht einem Plus von 73 % (International Energy Agency (IEA), 2018)⁹.

Abbildung 6 veranschaulicht, dass trotz der zugrunde gelegten Effizienzverbesserungen von einem steigenden Kerosinbedarf bis 2050 auszugehen ist. Je nach Szenario wird mit einem weltweiten Verbrauch von 484 bis 1096 Mio. t im Jahr 2050 gerechnet. Mit dem mittleren Szenario („Most Likely Scenario“) ergibt sich in Abhängigkeit von der angesetzten Effizienzentwicklung ein Kero-

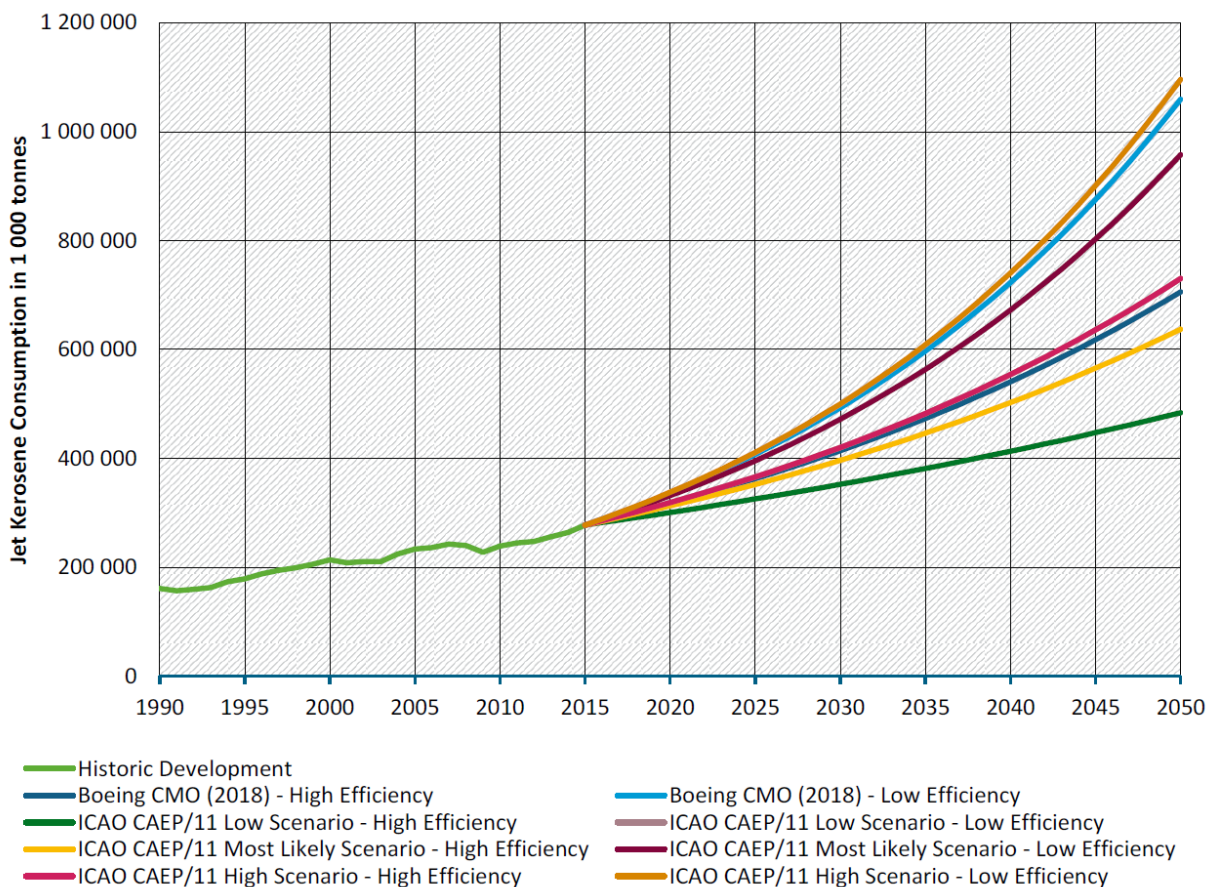
⁷ Die Effizienzverbesserung setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: a) der verbesserten technischen Effizienz der neuen Flugzeuge eines Jahres im Verhältnis zu den Neuflygezeugen des vorhergehenden Jahres, mit 0,76 %/Jahr, b) der stärkeren Zuladung in Flugzeugen, etwa durch mehr Sitze bei gleichem Rauminhalt im Flugzeug, mit 0,16 %/Jahr, c) Verbesserungen im Luftraummanagement, mit 0,10 %/Jahr, d) dem überdurchschnittlichen Zuwachs des Frachtsektors und dem Trend zu längeren Flugstrecken, mit 0,15 %/Jahr (Schäfer 2012).

⁸ Neben Kerosin wird eine geringe Menge Flugbenzin vertankt, die fast ausschließlich für Flugzeuge der Allgemeinen Luftfahrt verwendet wird. Es waren 1990 56.000 t und 2017 nur noch 9.542 t.

⁹ Für Personen- und Frachttransport, aber auch für militärische Flüge und zu einem geringen Anteil außerhalb der Luftfahrt.

sinverbrauch im Jahr 2050 von 637 Mio. t bzw. 958 Mio. t, also dem 2,3- bzw. 3,4-fachen des Verbrauchs im Jahr 2015 (Cames et al., 2019).

Abbildung 6: Prognosen des weltweiten Kerosinbedarfs bis 2050



Quelle: (Cames et al., 2019)

3.2 Klimarelevante Emissionen des Luftverkehrs und ihre Auswirkungen

3.2.1 Klimateffekte

Kohlendioxid (CO₂) und weitere Treibhausgase wie Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW), Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), Schwefelhexafluorid (SF₆) oder Stickstofftrifluorid (NF₃)¹⁰ greifen in die Strahlungsbilanz der Erde ein, indem sie die ankommende Sonnenstrahlung passieren lassen, jedoch nicht die von der Erdoberfläche abgestrahlte langwellige Wärmestrahlung. Dabei wird diese Wärmestrahlung zunächst von den Treibhausgasen der Erdatmosphäre absorbiert, um unmittelbar danach in alle Richtungen gleichmäßig – also auch in Richtung der Erdoberfläche – abgestrahlt zu werden. Dadurch kommt an der Erdoberfläche insgesamt mehr Strahlung an. Ein Gleichgewicht kann sich erst wieder einstellen, wenn die Erdoberfläche zum Ausgleich auch mehr abstrahlt, wozu sie wärmer werden muss. Der Treibhauseffekt und sein Beitrag zur anthropogenen Strahlungsverstärkung sind in sehr hohem Maße wissenschaftlich verstanden.

¹⁰ Diese Treibhausgase (einschließlich CO₂) sind über das Kyoto-Protokoll reglementiert. Seit 2015 wird Stickstofftrifluorid (NF₃) zusätzlich einbezogen.

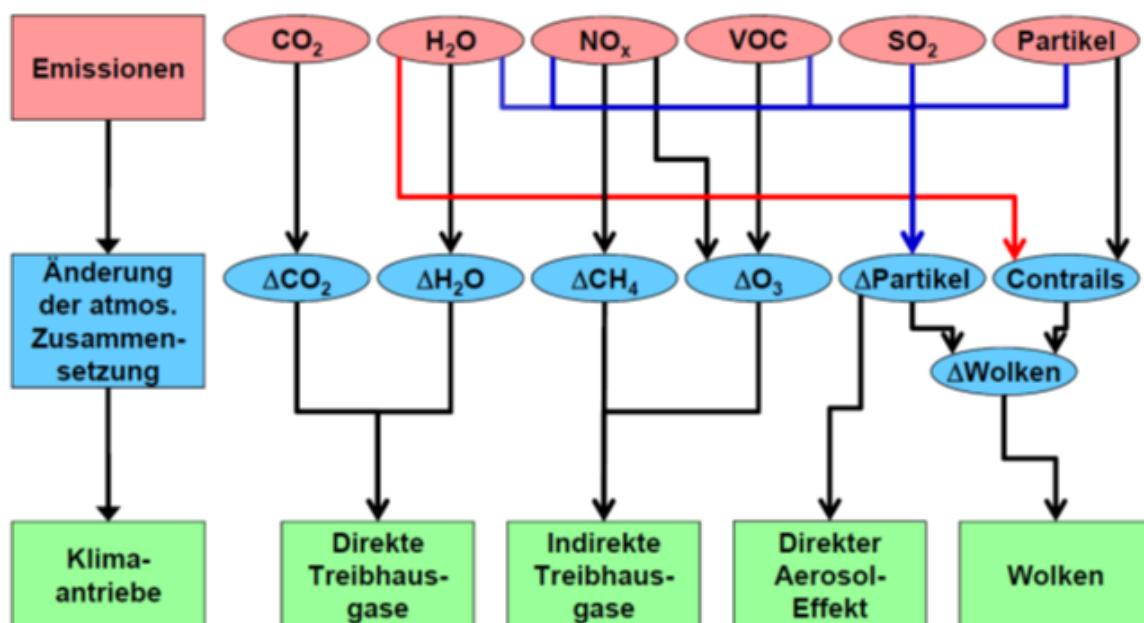
Der Luftverkehr emittiert beim Verbrennen von Kerosin nicht nur CO₂, sondern in kleineren Mengen auch CH₄ und N₂O.¹¹ Diese weiteren Treibhausgase spielen für den Luftverkehr aufgrund ihrer kleinen Emissionsmengen im Vergleich zur Klimawirkung der CO₂-Emissionen aber keine wesentliche Rolle. Sie tragen lediglich zu einer Erhöhung der Gesamt-Treibhausgaswirkung bei der Verbrennung des Kerosins von knapp 1 % bezogen auf die reinen CO₂-Emissionen bei (Lee, 2018b). Oder anders ausgedrückt: Wird durch ein Flugzeug 1 t CO₂ emittiert, dann entsprechen alle vom Flugzeug emittierten Treibhausgase der Klimawirkung von rund 1,01 t CO₂. Im folgenden Abschnitt 3.2.2 werden daher für den Luftverkehr ausschließlich die CO₂-Emissionen dargestellt, da diese bereits den Hauptteil der Treibhausgaswirkung des Luftverkehrs ausmachen und hierfür im globalen Maßstab umfassend Daten vorliegen.

Neben den Treibhausgasen, die direkt bei der Verbrennung des Kerosins im Triebwerk entstehen, gibt es weitere Emissionen des Luftverkehrs, die klimarelevant sind (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1999); (Sausen et al., 2005); (Lee et al., 2009); (Lee, 2018a); (Sausen et al., 2017). Es handelt sich vor allem um den Ausstoß von Partikeln, Wasserdampf, Schwefel- und Stickoxiden, die in Reiseflughöhe auf die Bildung von Aerosolen und Wolken sowie auf die Konzentrationen einiger atmosphärischer Gase Einfluss nehmen und so ebenfalls zur Änderung des Strahlungshaushaltes beitragen.

Manche dieser Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs wirken strahlungsverstärkend, tragen also zur Erwärmung der Atmosphäre bei, andere wirken strahlungsschwächend. Es ist aber wissenschaftlicher Konsens, dass die Nicht-CO₂-Effekte insgesamt eine strahlungsverstärkende Wirkung haben (Lee, 2018b). Die Nicht-CO₂-Effekte der einzelnen Emissionsbestandteile von Flugzeugabgasen sind in Abbildung 7 vereinfacht dargestellt und werden in der folgenden Box detaillierter beschrieben (Sausen et al., 2017).

Die Gesamt-Klimawirkung (CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte) des Luftverkehrs – auch auf Basis von einzelnen Flugreisen – behandelt Abschnitt 3.2.3. In Abschnitt 3.2.4 werden dann die langfristigen Klimaschutzanforderungen des Luftverkehrs abgeleitet.

Abbildung 7: Atmosphärische Effekte von Verkehrsemissionen



Quelle: (Sausen et al., 2017).

¹¹ Andere Treibhausgase wie H-FKW, FKW, SF₆ oder NF₃ werden bei der Verbrennung von Kerosin nicht emittiert.

Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs im Detail

Wasserdampf (H₂O)

Als wesentliches Reaktionsprodukt aus der Verbrennung von Kerosin im Triebwerk entsteht Wasserdampf (H₂O). Beim Luftverkehr wird ein großer Anteil des H₂O in Reiseflughöhe, d.h. zwischen 8 und 13 km Höhe, emittiert. Dort ist die (natürliche) Hintergrundkonzentration des Wasserdampfs um mehrere Größenordnungen geringer als in Bodennähe und die atmosphärische Lebensdauer des H₂O deutlich länger. Daher liefert hier der Luftverkehr einen merkbaren Beitrag zur Gesamtkonzentration des H₂O. Dieser Effekt verstärkt sich noch bei höheren Flugniveaus. Dennoch ist die Lebensdauer von einigen Tagen bis Wochen zu gering, um eine global homogene Verteilung des zusätzlichen H₂O zu bewirken. Der zusätzliche Wasserdampf aufgrund des Luftverkehrs führt zu einer geringen Erwärmungswirkung der Atmosphäre.

Stickoxide (NO_x)

Als Nebenprodukt entstehen bei der Verbrennung von Kerosin aufgrund der Oxidation von Stickstoff aus der Luft Stickoxide (NO_x). Im Zusammenspiel mit einer Reihe weiterer Gase – u. a. natürlichen und anthropogenen Kohlenwasserstoffen – führen die NO_x-Emissionen des Luftverkehrs zu einer katalytischen Ozonproduktion (O₃). Dieses Ozon hat eine atmosphärische Lebensdauer von zwei bis acht Wochen und wird daher ebenfalls nicht homogen in der Atmosphäre verteilt. Es führt zu einer Erwärmung.

Als Nebenprodukt bei der oben genannten O₃-Produktion fällt zusätzliches OH ab, das u. a. mit dem in der Atmosphäre vorhandenen Methan (CH₄) aus natürlichen und anthropogenen Quellen reagiert und dieses abbaut. Die Lebensdauer von Methan liegt bei knapp zehn Jahren; somit werden luftverkehrsbedingte CH₄-Änderungen annähernd homogen in der Atmosphäre verteilt. Dieser Effekt führt netto zu einer Abkühlung.

Infolge der reduzierten Methan-Konzentration nimmt auch die „natürliche“ Ozonproduktionsrate ab und damit stellt sich eine geringere Ozonkonzentration ein. Dieser Prozess läuft über mehrere Jahre und führt zu einer Abkühlung. Ebenfalls infolge der reduzierten Methan-Konzentration gelangt weniger Methan in die Stratosphäre; so kann sich dort weniger Wasserdampf bilden. Auch dieser Prozess läuft über mehrere Jahre und führt zu einer Abkühlung. In Summe führen alle hier genannten Prozesse, die ursprünglich auf den NO_x-Emissionen des Luftverkehrs beruhen, zu einer Erwärmung.

Kondensstreifen-Zirren

Bei geeigneten thermodynamischen Bedingungen führen die Wasserdampfemissionen des Luftverkehrs gemäß dem Schmidt-Appleman-Kriterium zur Bildung von linienförmigen Kondensstreifen (Schumann, 1996). Ist die Luft dann bezüglich Eis übersättigt und bezüglich Wasser untersättigt, können diese linienförmigen Wolken wachsen und längere Zeit bestehen. Sie können sogar zu Formationen, genannt Kondensstreifen-Zirren, anwachsen, die kaum noch von natürlichen Zirren zu unterscheiden sind. Die Lebensdauer von Kondensstreifen-Zirren, die auch linienförmige Kondensstreifen umfassen, liegt zwischen wenigen Minuten und etlichen Stunden. Je nach Strahlungsbedingungen (Sonnenstand, Helligkeit des Untergrunds, andere Wolken) wirken diese anthropogenen Wolken im Einzelfall erwärmend oder kühlend. Über den Globus und den ganzen Tag gemittelt erwärmen Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren. Der zugehörige Strahlungsantrieb – d. h. die Klimawirksamkeit dieser Emissionen bezüglich der Energiebilanz des Systems Erde – ist etwa zweimal so groß wie der aus dem CO₂ alleine. In den letzten Jahren gelang es den Strahlungsantrieb der Kondensstreifen-Zirren deutlich genauer zu quantifizieren (Burkhardt und Kärcher, 2011); (Bock und Burkhardt, 2019).

Direkte Aerosoleffekte

Der Luftverkehr emittiert sowohl Aerosole (z. B. Ruß) als auch Aerosolvorläufer (z. B. Stickstoff und Schwefelverbindungen), aus denen sich Aerosole bilden (z. B. Sulfat- oder Nitrathaltige Aerosole). Diese haben eine Lebensdauer von Tagen bis Wochen. Je nach Typ können sie abkühlend (z. B. Sulfat-haltige Aerosole) oder erwärmend (z. B. Ruß) wirken. Insgesamt sind ihre Beiträge zur Klimaänderung jedoch gering.

Indirekte Aerosoleffekte

Die von Flugzeugen emittierten Aerosole (z. B. Ruß) und Aerosolvorläufer, die zu Sulfat- und Nitrat-haltigen Aerosolen führen, können sich in der Atmosphäre zu Wolkenkondensationskernen weiter entwickeln. Damit beeinflussen sie dann „natürliche“ Wolken. Wenn mehr Kondensationskerne vorhanden sind, entstehen mehr Wolkentropfen und -kristalle. Damit werden Wolken langlebiger und reflektieren mehr Sonneneinstrahlung. Zudem können flugzeugbedingte Kondensationskerne, ähnlich wie andere natürliche oder anthropogene Kondensationskerne, weit transportiert werden und dann, sobald die passenden Hintergrundbedingungen vorliegen, die Bildung neuer Wolken ermöglichen. Hinsichtlich der Kondensationskerne aus dem Luftverkehr gibt es nur erste Abschätzungen der Wirkung auf niedrige („warme“) Wasserwolken (Righi et al., 2013). Danach führen diese Wolken zu einer Abkühlung. Wegen der ungenauen Kenntnis der Prozesse, die die Aerosole durchlaufen, sind die Abschätzungen des dazu gehörenden Strahlungsantriebs bestenfalls auf einen Faktor zwei bekannt. Für höher liegende Eiswolken lassen sich überhaupt noch keine belastbaren Aussagen treffen. Deshalb werden derzeit die indirekten Aerosoleffekte des Luftverkehrs bei der Gesamtbewertung seiner Klimawirkung in der Regel nicht berücksichtigt. Vermutlich führen sie zu einer geringeren Klimawirkung.

Weitere Effekte

Zuletzt wurden große Fortschritte bei der Modellierung der Folgen der Luftfahrt-NO_x-Emissionen erzielt. Hingegen werden jedoch weitere strahlungsmindernde Effekte aus dem Methanabbau diskutiert, die zuvor noch nicht analysiert wurden (Lee, 2018b).

Der Methanabbau über Hydroxylradikale ist eine bedeutende Quelle für Wasserdampf in der Stratosphäre. Zusätzlicher Wasserdampf in dieser sonst sehr trockenen Luftschicht führt zur Strahlungsverstärkung. Ein weiterer sekundärer Effekt neben der oben genannten Verminderung des Methans in der Stratosphäre ist, dass Methan zur Ozonbildung beiträgt, sodass längerfristig eine geringe Verminderung der Hintergrund-Ozonkonzentration resultiert. Darüber hinaus könnten Nitrat enthaltende Partikel einen kühlenden Effekt haben.

Diese drei Effekte sind noch nicht eingehend verstanden und quantifizierbar. Die dahinter liegende Atmosphärenchemie ist nichtlinear, sodass es keinen quantifizierbaren Effekt je Einheit emittierten NO_x geben kann. Die Hintergrundbedingungen am Ort der Emissionen bzw. Reaktionen haben einen großen Einfluss auf die Wirkung des NO_x. Neue Erkenntnisse gibt es über die Wirkung von Rußemissionen auf die Bildung hoher Zirruswolken. Sowohl das Vorzeichen als auch das Ausmaß der Strahlungsveränderung sind aber noch unklar (Lee, 2018b).

3.2.2 CO₂-Emissionen

In Deutschland verursachte der zivile Luftverkehr im Jahr 2017 rund 31,2 Mio. t CO₂¹², wovon ca. 2,1 Mio. t auf Inlandsflüge entfallen. 1990 lagen die CO₂-Emissionen des zivilen Luftverkehrs noch

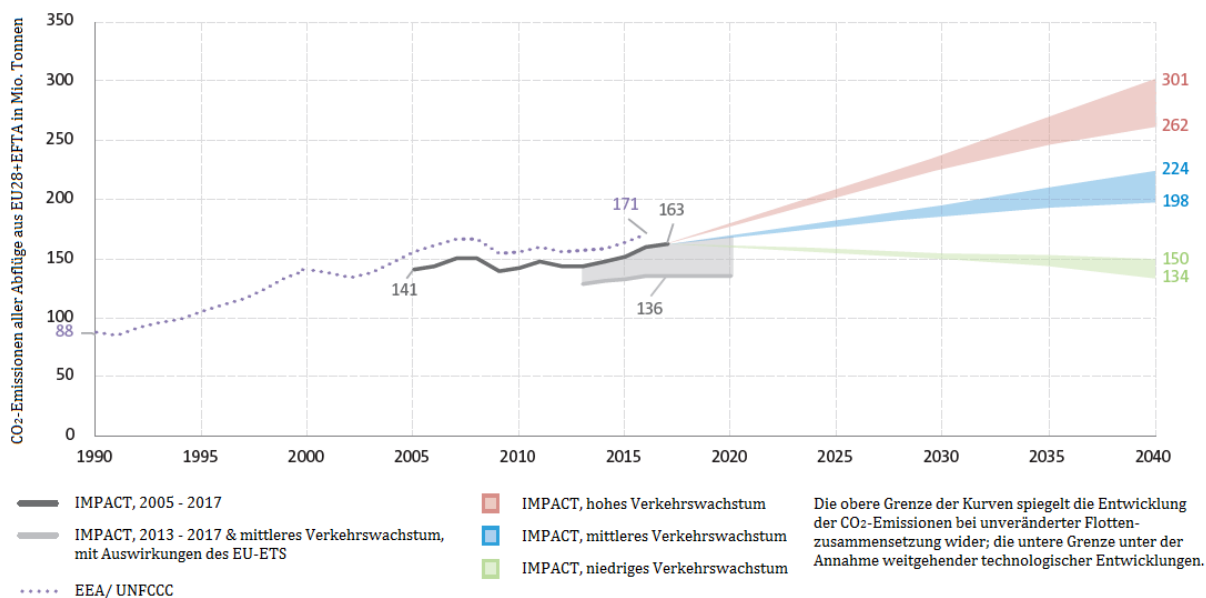
¹² Dies entspricht den in Deutschland vertankten Flugkraftstoffmengen laut Energiebilanz. Dabei ist sowohl Kerosin als auch Flugbenzin berücksichtigt. Letzteres spielt allerdings für die CO₂-Emissionen des zivilen Luftverkehrs in Deutschland nahezu keine Rolle.

bei rund 14,3 Mio. t (Inlandsflüge: 2,2 Mio. t). Im Zeitraum von 27 Jahren sind damit die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs in Deutschland um 117 % gestiegen (Strogies und Gniffke, 2019). Ohne weitergehende Maßnahmen werden auch die klimarelevanten Emissionen zukünftig weiter ansteigen. Studien im Auftrag des UBA und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) gehen im Referenzfall, d. h. ohne Maßnahmen, von rund 45 Mio. t CO₂-Emissionen des zivilen Luftverkehrs (national und international) im Jahr 2050 aus. Dies entspricht trotz weiterer Effizienzverbesserungen der Flugzeuge einem Zuwachs von rund 45 % gegenüber 2017 (Hermann et al., 2015).

Im European Aviation Environmental Report 2019 (European Aviation Safety Agency (EASA) et al., 2019) sind die CO₂-Emissionen des zivilen Luftverkehrs in Europa seit 1990 sowie Prognosen aus dem Modell IMPACT bis 2040¹³ dargestellt (Abbildung 8). Es werden drei verschiedene Szenarien ab 2017 betrachtet, die sich jeweils in der Entwicklung der Verkehrsleistung unterscheiden. In dem von der ICAO als am wahrscheinlichsten angenommenen Fall, dem „base traffic forecast“, steigen die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2040 ebenfalls weiter an, und zwar – je nach erwarteter technologischer Entwicklung – auf 198 Mio. t (+21 % gegenüber 2017) bis 224 Mio. t (+37 % gegenüber 2017).

Global trug der zivile und militärische Luftverkehr 2015 insgesamt mit ca. 875 Mio. t rund 2,5 % zu den gesamten anthropogenen CO₂-Emissionen bei (Lee, 2018a)¹⁴. Berücksichtigt man nur den zivilen Luftverkehr, beliefen sich die Emissionen im Jahr 2015 auf gut 770 Mio. t CO₂ und damit ca. 2 % der globalen CO₂-Emissionen. Im mittleren Szenario („Most Likely Scenario“) der ICAO würden die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs im Jahr 2050 auf 2,0 bis 3,0 Mrd. t ansteigen, falls zukünftig weiterhin fossiles Kerosin im Luftverkehr zum Einsatz kommt und lediglich Effizienzmaßnahmen berücksichtigt werden (Cames et al., 2019). Es wird deutlich, dass der Verlauf der CO₂-Emissionen in erster Linie vom Verkehrsaufkommen abhängt und technologische Veränderungen, wie Effizienzentwicklungen, dieses Wachstum nur leicht dämpfen.

Abbildung 8: CO₂-Emissionen des europäischen zivilen Luftverkehrs seit 1990 und Prognosen bis 2040



Quelle: (European Aviation Safety Agency (EASA) et al., 2019)

¹³ Alle in der EU-28 und den EFTA-Staaten startenden Flüge.

¹⁴ Entspricht 278 Mio. t Kerosin für alle Zwecke wie Personen- und Güterverkehr, sowie der militärische Verbrauch. Ein kleiner Teil des Kerosins wird außerhalb der Luftfahrt verwendet.

Eine besondere Herausforderung ist die Wiedereinführung von zivilen Überschallflugzeugen, die ca. 2026 zu erwarten ist. Untersuchungen des International Council on Clean Transportation (ICTT) deuten darauf hin, dass diese im Vergleich zu Unterschallflugzeugen auf den angenommenen Flugstrecken die 5- bis 7-fache Menge an CO₂ pro Passagier ausstoßen könnten (Anastasia Kharina et al., 2018). Hinzu kommt, dass diese Flugzeuge voraussichtlich höher fliegen werden, was die beschriebenen Nicht-CO₂-Effekte verstärkt (Abschnitt 5.1.1.4).

3.2.3 Gesamt-Klimawirkung (CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte)

Aus den vorhergehenden Abschnitten wird deutlich, dass im Vergleich zu den CO₂-Emissionen die Nicht-CO₂-Effekte von vielfältigen Prozessen der Luftchemie abhängen und die Höhe der Klimawirkung keineswegs proportional zur Höhe der CO₂-Emissionen ist. Sie sind entsprechend schwierig zu bestimmen, was in Abbildung 9 als Bandbreite des Strahlungsantriebs (Radiative Forcing, RF) zum Ausdruck kommt.¹⁵ Die strahlungsverstärkende Wirkung des Luftverkehrs insgesamt wurde für das Jahr 2000 mit 47,8 mW/m² angegeben – ohne die Wirkung durch induzierte Zirruswolken, die noch nicht ausreichend genau modelliert werden konnte (Sausen et al., 2005). Nach Daten von 2005 wurden für die gleichen Effekte rund 55 mW/m² (davon 28 mW/m² durch CO₂) ermittelt, entsprechend 3,5 % der gesamten anthropogenen Strahlungsverstärkung (Lee et al., 2009).¹⁶ Nimmt man die Schätzungen für die Wirkung induzierter Zirruswolken hinzu, kommt man für 2005 auf 78 mW/m² (28 mW/m² durch CO₂ entsprechen dabei ca. einem Drittel, das heißt die gesamte Strahlungsverstärkung entspricht etwa dreimal der des CO₂) RF¹⁷ (CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte), was ca. 4,9 % der gesamten anthropogenen Strahlungsverstärkung entspricht (Lee et al., 2009)¹⁸.

Der seitdem und für die kommenden Dekaden wachsende Luftverkehr wird die strahlungsverstärkende Wirkung weiter steigern. Der Anteil des Luftverkehrs an der gesamten anthropogenen Strahlungsverstärkung wird darüber hinaus überproportional zunehmen, da die anderen Sektoren voraussichtlich deutlich früher und weitergehend ihre CO₂-Emissionen mindern werden.

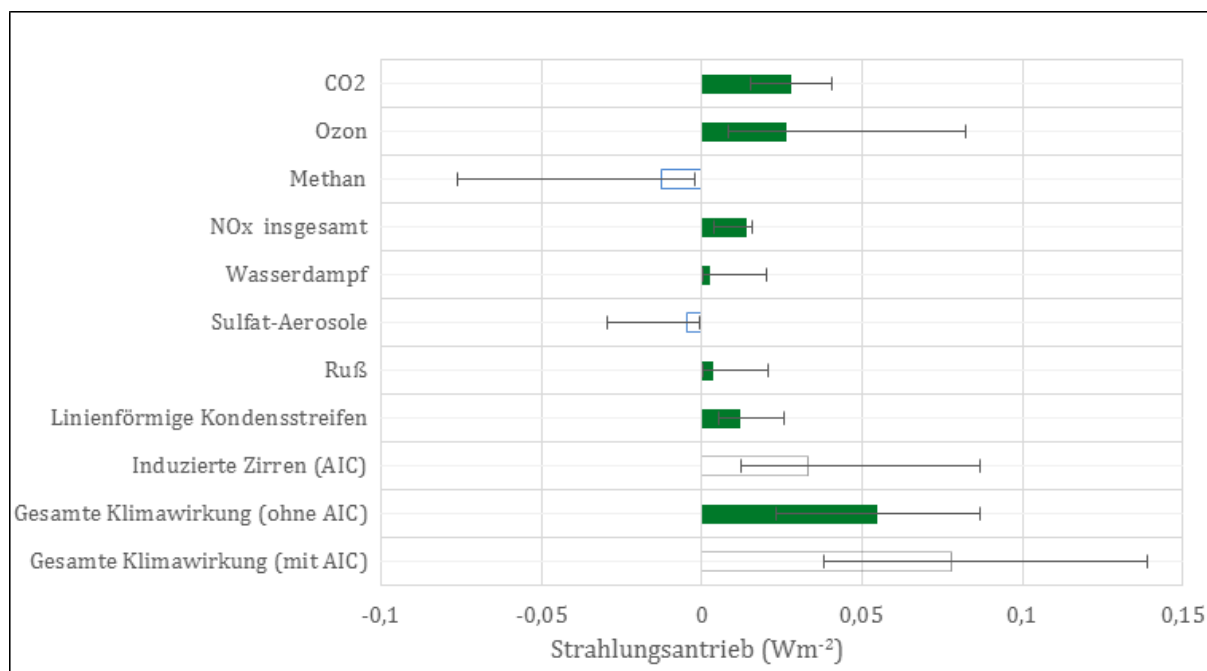
¹⁵ Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, ist der Strahlungsantrieb aufgrund der indirekten Aerosoleffekte vermutlich negativ. Dieser könnte einen Wert erreichen, der vom Betrag her den Beitrag aufgrund des CO₂ kompensieren würde. Derzeit ist wegen der sehr unterschiedlichen Lebensdauern der Effekte jedoch noch unklar, was dies für die gesamte Klimawirkung des Luftverkehrs bedeuten würde.

¹⁶ Das 90 %-Konfidenzintervall beträgt 23 - 87 mW/m².

¹⁷ Mit 90 %-Konfidenzintervall von 38 - 139 mW/m².

¹⁸ Der Bezugswert, das anthropogene RF, ist allerdings auch dynamisch anwachsend. 2005 betrug er 2,626 W/m² und 2017 3,062 W/m² (Butler und Montzka, 2018). Hier sind jedoch nur die Wirkungen der Treibhausgase und nicht die hier genannten Nicht-CO₂-Effekte enthalten.

Abbildung 9: Strahlungsantrieb (RF) der atmosphärischen Effekte des Luftverkehrs



Quelle: eigene Darstellung nach (Lee et al., 2009)

CO₂ verbleibt sehr lange in der Atmosphäre und wirkt entsprechend lange auf den Strahlungshaushalt. Die Nicht-CO₂-Effekte zur Klimaänderung laufen auf Zeitskalen ab, die um Größenordnungen kürzer sind als die des CO₂. Aufgrund der kurzen Lebensdauer der Nicht-CO₂-Effekte und der Variation der quantitativ bestimmenden Parameter unterscheiden sich in der Realität deren Klimawirkungen stark von Flug zu Flug (Sausen et al., 2017).

Allerdings gibt es mehrere Metriken, um die unterschiedlichen Effekte des Luftverkehrs hinsichtlich ihrer durchschnittlichen Klimawirkung zu vergleichen. Der Strahlungsantrieb RF summiert die Wirkung aller historischen Emissionen, ist also eine rückwärtsgewandte Metrik (Abbildung 9). Diese ist nicht geeignet, eine faire Bewertung von potentiellen Maßnahmen zur Reduzierung der Klimawirkung des Luftverkehrs vorzunehmen. Wirklich brauchbar sind die in der Wissenschaft verwendeten Metriken Average Temperature Response (ATR) und allenfalls noch Absolute Global Warming Potential (AGWP). AGWP berücksichtigt aber nur die reinen Strahlungsbeiträge, die Wirkung auf die Energiespeicherung im Klimasystem wird nicht betrachtet (Sausen et al., 2017). Aus Sicht des UBA sollte die Metrik ATR im Zusammenhang mit der Klimawirkung des Luftverkehrs verwendet werden. Dann liegt es nahe, einen Zeithorizont zu wählen, der approximativ der atmosphärischen Reaktionszeit entspricht, also mindestens 50 Jahre. Innerhalb dieser Zeit können sich einerseits die Atmosphäre und die oberste Schicht des Ozeans an das neue Gleichgewicht anpassen, und sich andererseits die langlebigen klimawirksamen Substanzen in der Atmosphäre anreichern.

Wenn man die gesamte Klimawirkung des Luftverkehrs approximativ mittels Metriken vergleichen will, ist es notwendig, dass man die Wirkungen für jeden einzelnen Effekt separat ermittelt und erst am Schluss die einzelnen Beiträge addiert (z. B. als CO₂-Äquivalente, CO_{2e}).¹⁹ Für die Optimierung von Flugrouten muss man sogar jeden Flug einzeln betrachten. Das ist bereits heute bei der Flugplanung der Fall. Für klimaoptimierte Flüge sind die Auswirkungen durch CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Effekte, z.B. in der Maßeinheit CO_{2e}, separat zu ermitteln und insgesamt zu minimieren. Ein konstanter Faktor, mit dem man die CO₂-Emissionen multipliziert, um

¹⁹ Das ist analog zum Kyoto-Protokoll.

die gesamten CO_{2e}- Emissionen zu erhalten, ist kein geeignetes Mittel, um Maßnahmen zur Reduzierung der Klimawirkung oder zur Regulierung des Luftverkehrs abzuleiten. Allerdings eignet sich ein solcher durchschnittlicher Faktor, um die Bedeutung der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs zu illustrieren, z. B. für die Ermittlung der Treibhausgaswirkung von Flügen zur Klimakompensation. Für diesen Zweck ist ein Faktor, der auf dem ATR basiert, am besten geeignet (Sausen et al., 2017). Eine im Auftrag des UBA durchgeführte und vor Veröffentlichung stehende Studie zur Auswirkung der Nicht-CO₂-Effekte gibt für die gesamte Klimawirkung des Luftverkehrs unter Verwendung der Metrik ATR und eines Zeithorizonts von 100 Jahren ein Verhältnis von 3-5 an (Dahlmann et al., 2019). Das berechnete Verhältnis hängt dabei davon ab, ob eine Pulsemission, also eine Emission über einen kurzen Zeitraum des betrachteten Zeithorizontes oder eine konstante Emission zu Grunde gelegt wurde.

Statt der Verwendung eines durchschnittlichen Faktors für alle Flüge kommt man der Klimawirkung einzelner Flüge bereits näher, wenn man Flugverbindungen in Cluster (z. B. für bestimmte Flugrouten wie Europa – Nordamerika) einteilt, für jedes Cluster separate Faktoren ermittelt und diese regelmäßig – entsprechend der Veränderungen im weltweiten Luftverkehr – aktualisiert (z. B. alle fünf bis zehn Jahre). Für die Einteilung der Cluster müsste man einzeln für alle Flüge die Gesamtklimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte aufgrund der Beiträge der einzelnen Effekte zum ATR ins Verhältnis zur Klimawirkung des reinen CO₂ setzen (ATR_{all}/ATR_{CO_2}). Diese Verhältnisse, die u. a. von der Flugdistanz, der geographischen Region, durch die der Flug führt und dem Flugzeugtyp abhängen, kann man – so der derzeitige wissenschaftliche Kenntnisstand – mittels einer Clusteranalyse in fünf bis zehn Cluster²⁰ einteilen (Sausen et al., 2017).²¹

Aktuell werden bei der Darstellung der Wirkung der Nicht-CO₂-Effekte oftmals noch andere Metriken hilfsweise angewendet. Das UBA verwendet beispielsweise beim Verkehrsemissionsmodell TREMOD (Transport Emission Model) aktuell noch die Metrik „Emission Weighting Factor“ (EWF). Der EWF gibt die Strahlungswirkung einer Emission für die ersten 100 Jahre nach dem Zeitpunkt der Emission an. Beim EWF werden die Strahlungsverstärkungen (RF) der aus der Verbrennung der Kraftstoffe entstehenden Nicht-CO₂-Effekte mit den Treibhaus-Effekten von CO₂ verglichen. Der EWF wird bei Flughöhen größer 9 km angewendet und wird mit 1,2-2,7 quantifiziert. In TREMOD wird ein EWF von 2,4 für alle Flüge oberhalb 9 km verwendet. Das ergibt im Mittel einen EWF von etwa 2,0 für den gesamten Luftverkehr (Knörr et al., 2012). Im Jahr 2017 hatte damit der Luftverkehr durchschnittliche Treibhausgasemissionen von 201 g CO_{2e} pro Personenkilometer (Pkm). Im Vergleich mit dem Auto liegen die Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs um 45 % (Pkw: 139 g CO_{2e} /Pkm), gegenüber der Bahn und dem Reisebus sogar um mehr als 450 % höher (Bahn Fernverkehr: 36 g CO_{2e} /Pkm, Reisebus: 32 g CO_{2e} /Pkm).²² Bei Überschallflügen wird ein deutlich höherer Aufschlag für Nicht-CO₂-Effekte benötigt, da diese voraussichtlich deutlich höher und somit in klimatisch empfindlicheren Luftschichten fliegen werden.

Unberücksichtigt bleibt bei Werten pro Personenkilometer, dass Flugreisen in der Regel zu größeren Reisedistanzen führen. Ein Hin- und Rückflug nach beispielsweise Ägypten summiert sich auf über 6.000 km Flugstrecke, ein Hin- und Rückflug nach Sydney auf über 30.000 km (Abbildung 10). Bei einem Urlaub mit dem Pkw werden in den seltensten Fällen mehr als 2.000 km zurückgelegt. Selbst die Jahresfahrleistung eines Pkw betrug nach TREMOD im Jahr 2017 lediglich rund 14.300 km. Damit liegen nicht nur die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Flug, sondern

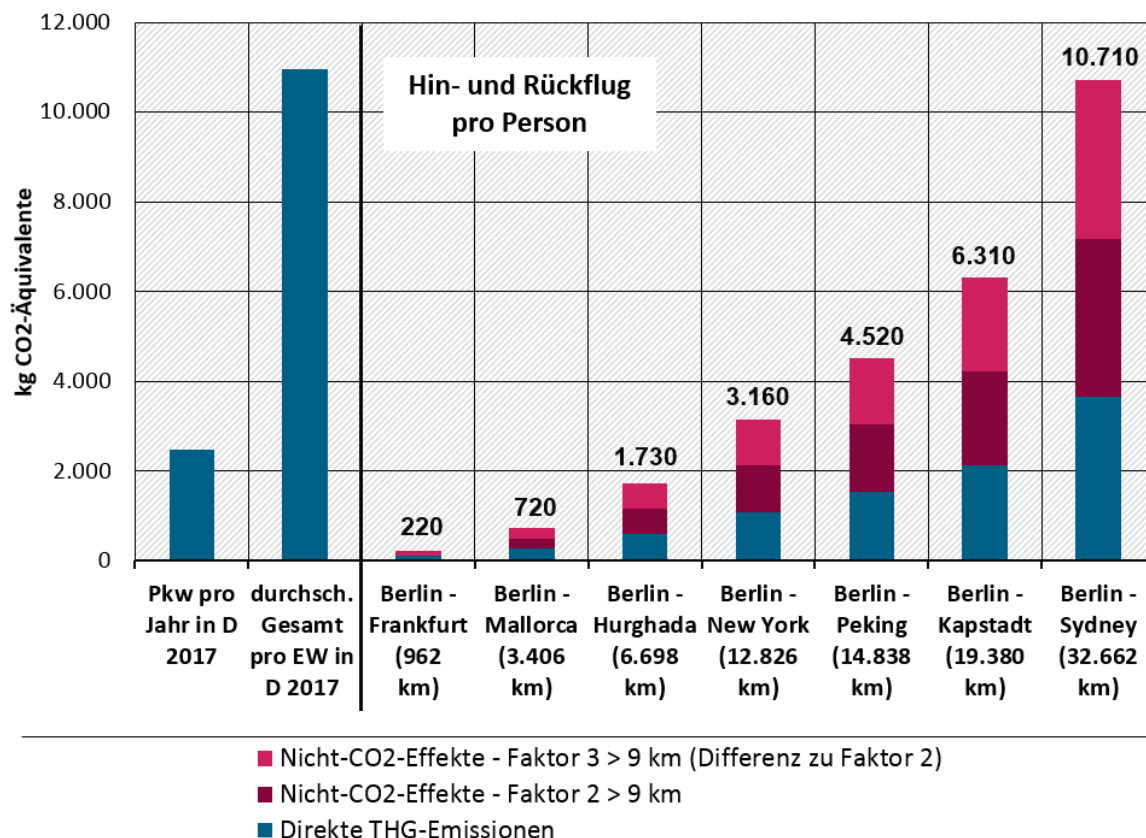
²⁰ Es gibt keine kanonische Anzahl von Clustern, sondern man trifft eine subjektive Entscheidung so, dass die einzelnen Cluster sich in ihrem mittleren ATR_{all}/ATR_{CO_2} hinreichend weit unterscheiden und gleichzeitig die Anzahl praktikabel bleibt.

²¹ Dieser Clusteransatz wird im Auftrag des UBA im laufenden Projekt „Möglichkeiten der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten im Luftverkehr am Beispiel des EU-ETS und von CORSIA“ konkretisiert.

²² Siehe <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0> (Abruf der Internetseite: 28.06.2019). Diese Angaben berücksichtigen neben CO₂ nicht nur die weiteren Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel, sondern auch die Emissionen zur Herstellung der Kraftstoffe und des Stroms.

auch die Wegstrecke pro Flugreise viel höher als bei den vergleichbaren Verkehrsmitteln im Fernverkehr wie Bus, Bahn oder Pkw. Dies führt dazu, wie Abbildung 10 zeigt, dass bereits mit einer einzelnen Langstrecken-Flugreise ein höherer Klimaschaden entstehen kann als bei einem Jahr Autofahren (rund 2.470 kg CO_{2e} pro Jahr). Dabei ist zu beachten, dass bei diesem Vergleich der Emissionen die Herstellung des Kerosins, Benzins bzw. Diesels nicht berücksichtigt sind.

Abbildung 10: Klimawirkung von Hin- und Rückflug pro Person im Vergleich



Quellen: eigene Darstellung nach www.atmosfair.de (Sept. 2019)

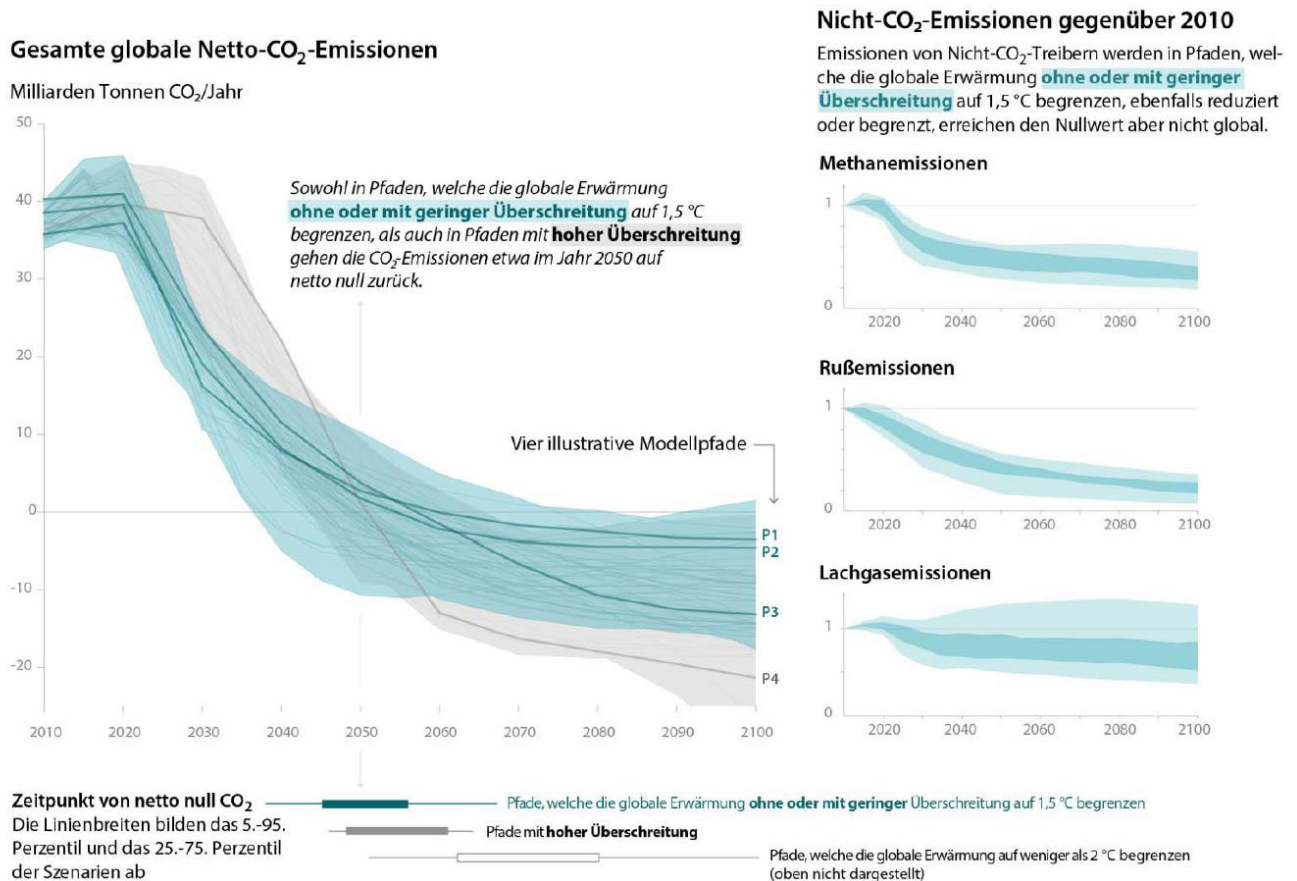
3.2.4 Langfristige Klimaschutzfordernisse

Mit dem Übereinkommen von Paris (ÜvP) haben sich nach aktuellem Stand (Reh et al., 2015) 185 von 196 Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention verpflichtet, gemeinsam die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg bereits bei 1,5 °C zu stoppen (Reh et al., 2015). Da es sich bei diesem Ziel um ein Temperatur-Ziel handelt, sind grundsätzlich alle Emissionen und klimaverändernden Effekte zu berücksichtigen und damit neben dem CO₂ auch die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs.

Der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) hat im Jahr 2018 einen Sonderbericht veröffentlicht, in dem unter anderem die zur Einhaltung des 1,5°C-Ziels notwendigen Treibhausgas-Emissionspfade dargestellt werden (Allen et al., 2018). Eine Kernaussage des Berichtes ist, dass in modellierten Pfaden mit keiner oder geringer Überschreitung von 1,5 °C die anthropogenen CO₂-Emissionen bis 2030 bereits um etwa 45 % gegenüber 2010 abnehmen und um das Jahr 2050 Netto-Null erreichen müssen. Für die Einhaltung des 2°C-Ziels werden mehrheitlich Reduktionspfade modelliert, die bis 2030 zu etwa 25 % CO₂-Reduktion führen, um ungefähr 2070 Null zu erreichen. In beiden Fällen muss außerdem anschließend CO₂ aus der Atmosphäre entnommen werden, um das Ziel der Netto-Null-Emissionen bis 2050 zu erreichen. Die

weiteren Treibhausgasemissionen Methan, Lachgas und Ruß bewegen sich zur Einhaltung des 1,5°C-Ziels in etwa auf Pfaden der CO₂-Emissionen zur Einhaltung des 2°C-Ziels. Die im Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs sind davon aber zu unterscheiden. In Abbildung 11 sind verschiedene globale Minderungspfade zur Einhaltung des 1,5°C-Ziels dargestellt, wobei die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs nicht berücksichtigt sind.

Abbildung 11: Eigenschaften globaler Minderungspfade



Quelle: (Allen et al., 2018)

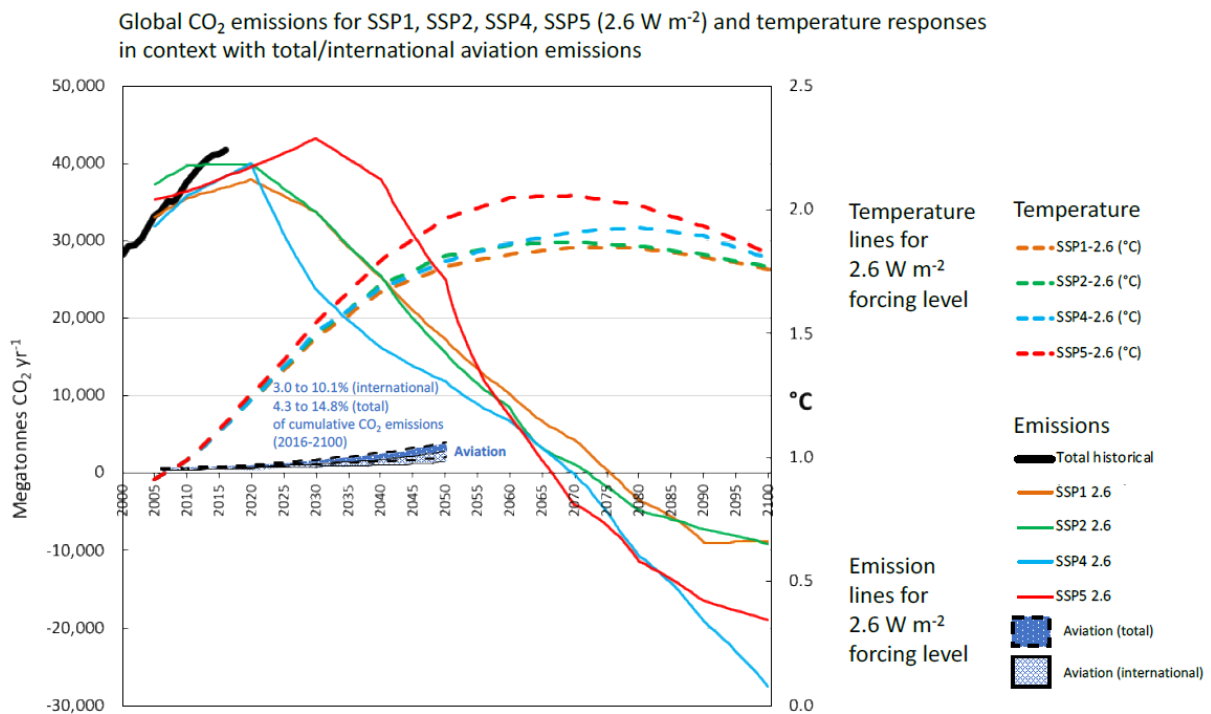
Eine Studie vom Dezember 2018 befasst sich damit, wie die aktuell prognostizierten CO₂-Emissionen des Luftverkehrs mit dem 2°C-Ziel vereinbar sind (Lee, 2018b). Da zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen die modellierten Pfade für das 1,5°C-Ziel noch nicht vorlagen, konnte die Studie dafür noch keine Aussagen treffen. Diese Berechnungen gingen von zwei Emissions-Szenarien aus, welche die Ober- und die Untergrenze bestimmen: a) ein Szenario, bei welchem technologische und operative Verbesserungen maximal prognostizierte Werte erreichen und das Luftverkehrswachstum den minimal prognostizierten Wert folgt – in diesem Szenario steigen die Emissionen am geringsten; b) umgekehrter Fall – in diesem Szenario steigen die Emissionen am stärksten.

In Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Simulationen graphisch dargestellt. Die durchgezogenen farbigen Linien geben die angenommenen jährlichen globalen CO₂-Emissionen entsprechend vier verschiedenen Szenarien (SSP-Pfade / Shared Socio-Economic Pathways) (Riahi et al., 2017) wieder, die zur Erreichung des 2°C-Ziels notwendig wären.²³

²³ Ein Langfristziel von maximal 2 °C Erwärmung entspricht ungefähr einer Strahlungsverstärkung von 2,6 W/m².

Der SSP1-Pfad entspricht von seiner Bedeutung etwa den P1- und P2-Pfaden der Abbildung 11, d. h. die zugrunde liegenden sozialen und wirtschaftlichen Entwicklungen sind ähnlich. Der SSP2-Pfad ist vergleichbar mit dem P3-Pfad und der SSP5-Pfad ist vergleichbar mit dem P4-Pfad der Abbildung 11. Die gestrichelten farbigen Linien zeigen die korrespondierenden Temperaturverläufe.

Abbildung 12: Globale CO₂-Emissionen verschiedener Szenarien und entsprechende Temperaturverläufe im Vergleich zu CO₂-Emissionen des Luftverkehrs



Quelle: (Lee, 2018a)

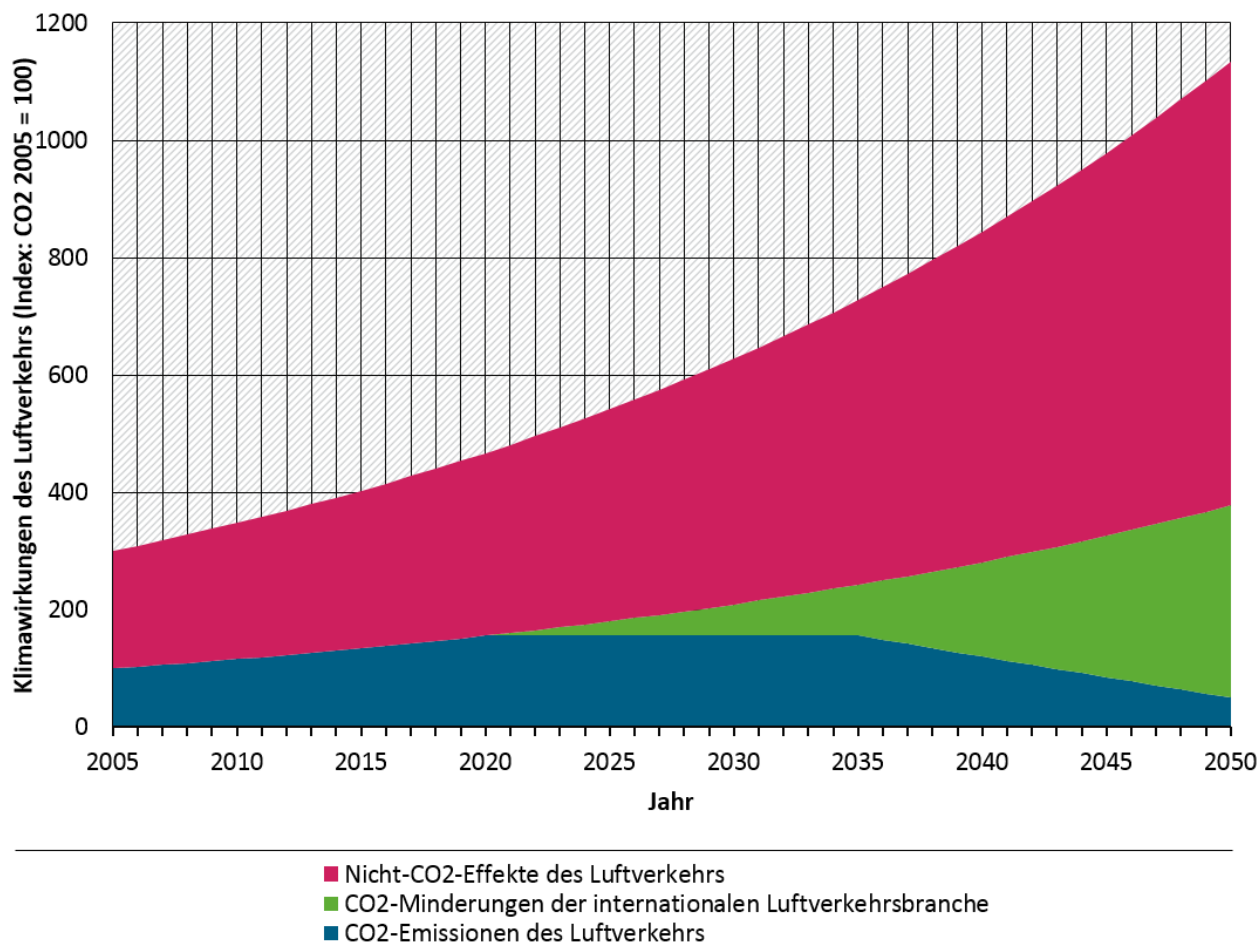
Demnach benötigt der gesamte zivile Luftverkehr, also der grenzüberschreitende (internationale) sowie nationale Luftverkehr, aufgrund seines Wachstums bis zum Jahr 2050 zwischen 4,3 und 14,8 % des zur Einhaltung des 2°C-Ziels bis 2100 noch zur Verfügung stehenden CO₂-Budgets. Der internationale Luftverkehr hat an diesem CO₂-Budget einen Anteil von 3,0 bis 10,1 %. Für die Einhaltung des 1,5°C-Ziels wäre der Anteil der Luftverkehr nochmals deutlich höher. Da für dieses Ziel die globalen CO₂-Emissionen etwa im Jahr 2050 bereits Null betragen müssen, müsste jede vom Luftverkehr emittierte Tonne CO₂ zu diesem Zeitpunkt an anderer Stelle der Atmosphäre entzogen werden oder der Luftverkehr selbst muss – was aus umweltpolitischer Sicht sinnvoll ist – seine Treibhausgasemissionen auf null reduzieren und damit treibhausgasneutral werden.

Die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs sind dabei noch nicht berücksichtigt. Da diese Effekte bei Einsatz heutiger Antriebstechnik nur gemindert, aber nicht auf null reduziert werden können, ist klimaneutrales Fliegen nach Einschätzung des UBA auch langfristig nicht möglich. Dies verschärft die Konsequenzen der oben genannten Argumentation zur Vereinbarkeit des Luftverkehrs mit dem 2°C-Ziel hin zu noch früheren Zeitpunkten, ab denen gesamtglobal negative Emissionen erforderlich werden, um die globalen Klimaschutzziele zu erreichen.

In Abbildung 13 ist dargestellt, wie sich die Klimawirkungen von CO₂ und Nicht-CO₂-Effekten im Zeitraum von 2005 bis 2050 in etwa entwickeln würden, wenn diese in einem Szenario mit hohen operativen und technischen Verbesserungen aufgrund des Wachstums des Luftverkehrs um ca.

3 % jährlich zunehmen²⁴. Der blaue sowie der grüne Bereich stehen dabei für die direkten CO₂-Emissionen der Flugzeuge. Das Verhältnis aller Nicht-CO₂-Effekte zum CO₂ wird hier vereinfachend mit 2:1 angenommen, da der Fokus hauptsächlich auf der Veranschaulichung der Größenordnungen der Effekte liegt. Ohne zusätzliche Minderungsmaßnahmen würde die CO₂-Klimawirkung des globalen zivilen Luftverkehrs durch die Summe beider Bereiche ausgedrückt. Im Jahr 2050 ergäbe sich eine um den Faktor 3,8 höhere Klimawirkung im Vergleich zum Jahr 2005.

Abbildung 13: Entwicklung von CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Effekten in einem Szenario mit hohen operativen und technischen Verbesserungen



Quelle: Umweltbundesamt

Die internationale Luftfahrtbranche – Fluggesellschaften, Luftfahrzeughersteller und Flughäfen – haben sich bisher nur darauf verständigt, die direkten CO₂-Emissionen zu reduzieren. Konkret soll der Kerosinverbrauch um 1,5 % pro Jahr gesenkt werden, das Wachstum des Luftverkehrs ab 2020 CO₂-neutral erfolgen und die Netto-CO₂-Emissionen des zivilen Luftverkehrs gegenüber 2005 bis zum Jahr 2050 halbiert werden (Schmidt et al., 2016). In Abbildung 13 sind diese weltweiten Minderungsmaßnahmen der Luftfahrtbranche als grüne Fläche dargestellt. Um die CO₂-Emissionen zu begrenzen, wurde der Luftverkehr auf europäischer Ebene im Jahr 2012 in den

²⁴ ICAO CAEP/11(2017) Most Likely Scenario: 2,4 %-3,6 % pro Jahr Steigerung des Endenergiebedarfs 2012-2050. Der Airbus Global Market Forecast (Airbus, 2018) und der Boeing Current Market Outlook (Boeing, 2018) gehen für die Zeit bis 2035 bzw. 2036 von ähnlichen Steigerungsraten aus. Die prozentuale Veränderung der Endenergiebedarfe entspricht der prozentualen Veränderung der CO₂-Emissionen.

Emissionshandel einbezogen. Auf internationaler Ebene findet eine Einbeziehung ab dem Jahr 2021 durch das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA) statt. Diese Maßnahmen sind in Abschnitt 5.1 ausführlich beschrieben. Insbesondere diese Maßnahmen sollen den CO₂-Ausstoß des Luftverkehrs, wie in der Abbildung 13 dargestellt, ab dem Jahr 2020 konstant halten und später auf 50 % des Ausgangsniveaus von 2005 reduzieren.

Es wird aus der Abbildung 13 aber auch deutlich, dass dies nicht ausreichend ist, um die Klimawirkung des Luftverkehrs nur annähernd bis 2050 auf null zu bringen, um so sicher das 2°C-Ziel und idealerweise das 1,5°C-Ziel zu erreichen. Ein Grund hierfür ist insbesondere, dass die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs (roter Bereich der Abbildung) bisher nicht in die Zielfestlegungen und damit in die geplanten Maßnahmen der internationalen Luftfahrtbranche einbezogen werden. Die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs treten selbst beim Einsatz alternativer postfossiler Kraftstoffe auf. Zur Einhaltung des 2°C-Ziels und erst recht des 1,5°C-Ziels sind daher ambitioniertere Minderungsmaßnahmen notwendig als bisher beschlossen, und zwar für alle Klimaeffekte des Luftverkehrs.

3.3 Luftbelastung und ihre Auswirkungen

3.3.1 Luftqualität an deutschen Flughäfen

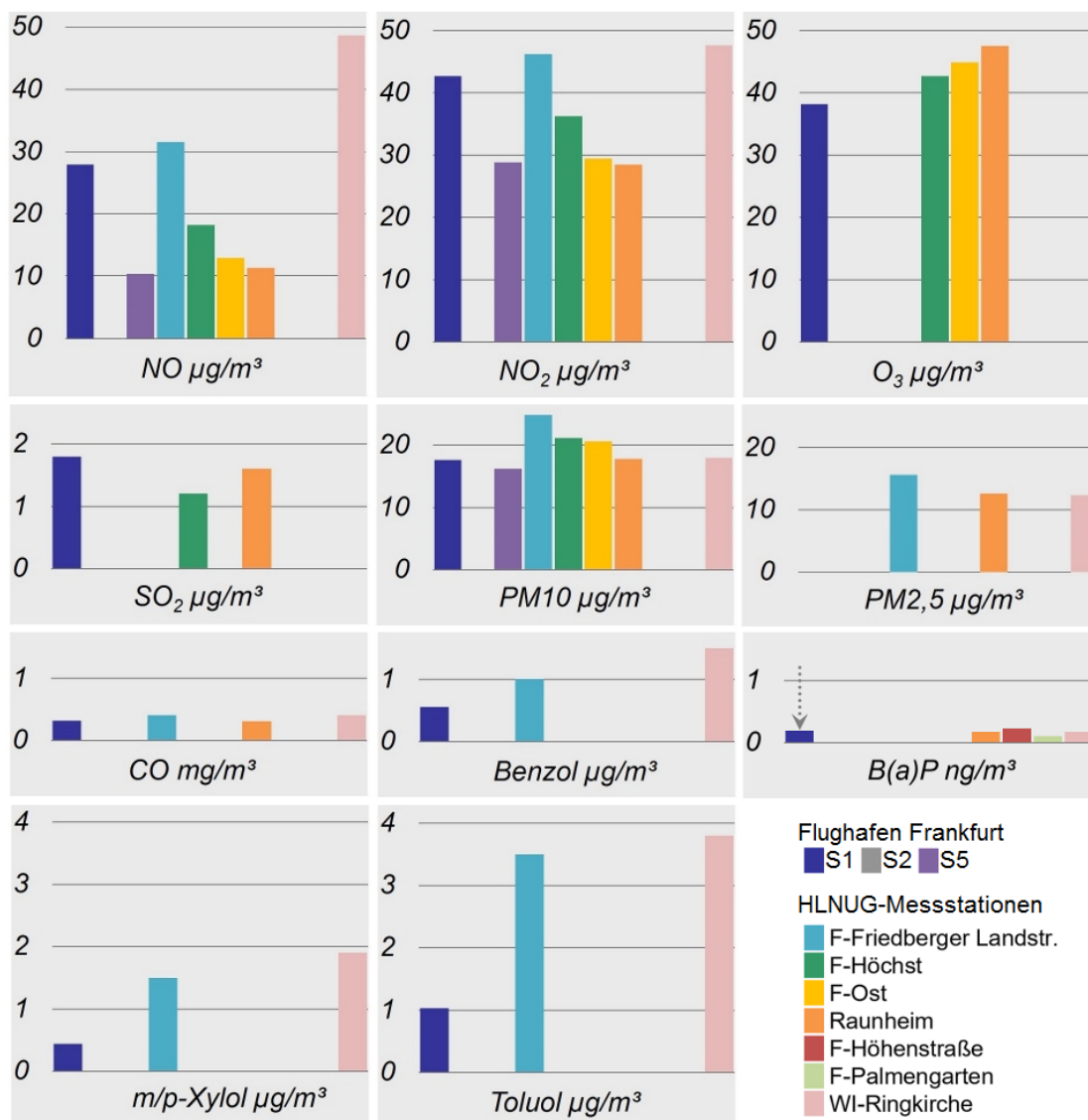
Die Luftqualität im Umfeld deutscher Flughäfen wird von verschiedenen Schadstoffen beeinflusst, die zudem aus unterschiedlichen Quellen stammen. Neben den Luftschadstoffemissionen der Luftfahrzeuge tragen auch der landgebundene Zubringerverkehr, flughafeninterne Verkehre sowie mobile und stationäre Anlagen auf dem Flughafen zur Belastung bei. Zur Bewertung der Luftqualität im Umfeld von Flughäfen sind die europäischen Luftqualitätsrichtlinien (2008/50/EG, 2004/107/EG) heranzuziehen, die mit der 39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in deutsches Recht überführt sind.²⁵ In dieser Verordnung sind Grenz- und Zielwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit für verschiedene Luftschadstoffe festgelegt. Auf das Betriebsgelände von Flughäfen sind diese Grenz- und Zielwerte zwar nicht anwendbar, werden jedoch zur vergleichenden Betrachtung nachfolgend herangezogen.

So stellt Abbildung 14 exemplarisch die im Jahr 2018 an den zwei Messstationen (S1, S5)²⁶ auf dem verkehrsreichen Flughafen Frankfurt/Main ermittelten Luftschadstoffkonzentrationen im Vergleich zu städtischen Messwerten des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) im Großraum des Flughafens in Frankfurt, Wiesbaden und Raunheim dar. Die Messstation S2 wurde 2017 stillgelegt und erfasst daher keine Luftschadstoffkonzentrationen.

²⁵ Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juli 2018 (BGBl. I S. 1222) geändert worden ist.

²⁶ Der Messstationen S1 und S5 befinden sich im Randbereich des Flughafengeländes.

Abbildung 14: Luftschadstoffmessungen im Raum Frankfurt (Mittelwerte des Jahres 2018)



Abkürzungen der Luftschadstoffe:

NO: Stickstoffmonoxid; NO₂: Stickstoffdioxid; O₃: Ozon; SO₂: Schwefeldioxid; PM₁₀: Partikel bis 10µm; PM_{2,5}: Partikel bis 2,5µm; CO: Kohlenmonoxid; B(a)P: Benzo[a]pyren; m/p-Xylol: meta-/para-Xylol

Quelle:(Fraport AG - Frankfurt Airport Services Worldwide, 2018)

Im Vergleich zu den Messwerten im Umfeld des Flughafens zeigen die auf dem Flughafengelände erhobenen Messwerte vergleichbare Größenordnungen. Lediglich der Messpunkt S1 registrierte 2018 eine geringfügige Überschreitung des Grenzwertes im Jahresmittel für Stickstoffdioxid (NO₂), der bei 40 µg/m³ liegt. Für alle anderen Stoffe liegen die auf dem Flughafengelände erhobenen Konzentrationen zum Teil deutlich unter den Grenz- und Zielwerten zum Schutz der menschlichen Gesundheit und unter den an verkehrsnahen Messstationen in Frankfurt und Wiesbaden ermittelten Werten. Für den Feinstaub kann insofern noch keine abschließende Aussage getroffen werden, als Daten für den lungengängigen Feinstaub (PM_{2,5}) in Flughafennähe nicht vorliegen. Mit Blick auf die in Deutschland geltenden Grenz- und Zielwerte zum Schutz der Gesundheit kann festgestellt werden, dass die auf dem Flughafengelände erhobenen Luftqualitätsdaten keine auffälligen oder ungewöhnlich erhöhten Belastungsbefunde liefern.

Eine Partikelgruppe, die noch Gegenstand der Forschung ist und die daher noch nicht in der routinemäßigen Luftqualitätsüberwachung bewertet werden kann, sind ultrafeine Partikel. Als ultrafeine Partikel (UFP) bzw. Ultrafeinstaub werden nach der gängigsten Definition luftgetragene Par-

tikel mit einem Durchmesser zwischen 1 und 100 Nanometer (nm) bezeichnet. Aufgrund ihrer geringen Größe und Masse sind Messverfahren, welche für größere Fraktionen des Feinstaubes (PM₁₀, PM_{2,5}) gängig sind, für die Messung von UFP ungeeignet. Daher kommen partikelzählende Verfahren und die Größenklassifizierung zur Anwendung. Bei vielen UFP handelt es sich um Rußpartikel, die bei unvollständigen Verbrennungsprozessen entstehen. Erhöhte UFP-Konzentrationen in der Außenluft gehen zumeist auf Emissionen aus dem Verkehrsbereich zurück – so auch aus dem Luftverkehr. Im Rahmen des deutschen Messnetzes für ultrafeine Aerosolpartikel (GUAN - German Ultrafine Aerosol Network) führen mehrere wissenschaftliche Institutionen und Behörden seit einigen Jahren Langzeitbeobachtungen von UFP in Deutschland durch. Der Langzeitmittelwert der UFP-Anzahlkonzentration reicht von Hintergrundwerten um 1000 Partikel pro cm³ an Bergstationen bis in den Bereich von 10.000 Partikel pro cm³ an verkehrsnahen Messstellen, bezogen auf 20 - 100 nm Partikeldurchmesser (Birmili et al., 2018). Direkte Messungen von Flugzeugtriebwerken zeigten, dass zwei Arten von UFP produziert wurden: nicht flüchtiger Ruß (Black Carbon) und kondensierte schwefelhaltige Partikel (Petzold et al., 2011).

Wissenschaftliche Studien zeigten eine Erhöhung der UFP-Konzentration in einigen Kilometern Entfernung von Flughäfen in den USA (vierfach erhöhte Werte in 10 km Entfernung) bzw. zusätzlich eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung hin zu sehr kleinen Partikeln von ca. 10 bis 20 Nanometer Durchmesser in den Niederlanden und Dänemark (Lorentz et al., 2019). Bei Untersuchungen an zwei großen Flughäfen in den USA (Los Angeles und Atlanta) wurde auf der dem Wind abgewandten Seite ein drei- bis fünffacher Anstieg der UFP-Konzentrationen unterhalb landender Flugzeuge gefunden (Riley et al., 2016). In Frankfurt/Main werden an Messstationen in 10 bzw. 5 km Entfernung vom Flughafen bei Wind aus Richtung des Flughafens zwei- bzw. sechsmal höhere UFP-Konzentrationen im Vergleich zu Wind aus anderen Richtungen berichtet (Rose und Jacobi, 2018).

In einer aktuellen Studie für das UBA wurde der Einfluss eines Großflughafens auf die Außenluftkonzentrationen von Ultrafeinstaub in einer Fläche von 30 km x 30 km bezogen auf den Jahresmittelwert modelliert. Als Quellen wurden Flugzeuge, bodennahe Quellen des Flughafengeländes, der Straßenverkehr sowie der Hintergrund (u. a. Industrie, Hausbrand) berücksichtigt. Ziel der Studie war es, Aussagen zum Anteil des Flughafens in Bezug auf die Gesamtbelastung treffen zu können. Die modellierte UFP-Konzentration war unter anderem stark von der Entfernung vom Flughafen und der Hauptwindrichtung abhängig. Beispielsweise betrug dessen Einfluss auf die UFP-Gesamtbelastung ca. 10 bis 20 % an einem 5 km vom Flughafen gelegenen Ort, der in einem Wohngebiet in einer Nebenwindrichtung (südwestlich) liegt. Allerdings ist anzumerken, dass bei diesem Modellansatz aufgrund methodischer Restriktionen der Anteil für Flugzeuge und PKW an den Gesamt-UFP in zurzeit nicht zu benennender Größe unterschätzt wird (Lorentz et al., 2019).

3.3.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Im Folgenden wird der aktuelle Kenntnisstand zu den gesundheitlichen Auswirkungen von NO₂ und Feinstaub mit Fokus auf UFP aufgezeigt, da beide Luftschadstoffe bei den im vorangegangenen Abschnitt 3.3.1 aufgeführten Messungen am Flughafen Frankfurt/Main identifiziert werden konnten und in Konzentrationen gemessen wurden, bei denen negative gesundheitliche Wirkungen zum Teil nicht ausgeschlossen werden können.

NO₂ hat eine stark oxidative Wirkung. Seine relativ geringe Interaktion mit den Strukturen der oberen Atemwege führt dazu, dass der Schadstoff tief in den Atemtrakt eindringt. Im Lungengewebe verursacht NO₂ bei Kontakt Zellschäden und löst entzündliche Prozesse aus. Insgesamt kann dies zu einer Hyperreagibilität der Bronchien führen. Hyperreagibilität wird als ein Risikofaktor für die Entwicklung allergischer Atemwegserkrankungen angesehen (Landesamt für Natur, 2010); (United States. Environment Protection Agency (EPA), 2016).

Epidemiologische Studien zeigen zudem Zusammenhänge zwischen einer kurzzeitigen NO₂-Exposition und einer erhöhten Gesamtmortalität und insbesondere der Mortalität aufgrund von Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen (Kutlar Joss et al., 2015). Auch für vermehrte Krankenhausaufnahmen aufgrund von Atemwegserkrankungen (z. B. Asthma) und Herzinfarkten wurde ein Zusammenhang mit kurzfristig erhöhter NO₂-Exposition identifiziert (Anderson et al., 2013); (Mustafić et al., 2012). Ältere Menschen und Kinder zeigten sich im Allgemeinen empfindlicher gegenüber einer NO₂-Exposition. Studien zu Langzeiteffekten zeigen einen Zusammenhang zwischen langjähriger NO₂-Belastung und Mortalität (Gesamtsterblichkeit, Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, Lungenkrebs) (Atkinson et al., 2018). Des Weiteren zeigen Studien erste Hinweise darauf, dass eine langfristige Exposition gegenüber NO₂ mit einem erhöhten Risiko für die Entstehung von Lungenkrebs verbunden ist (Raaschou-Nielsen et al., 2013). Auch die Entwicklung von chronischen Atemwegsbeschwerden (z. B. Asthma) bei Erwachsenen und Kindern stehen in Zusammenhang mit einer langfristigen NO₂-Belastung. Des Weiteren kann durch erhöhte NO₂-Belastungen die Lungenfunktion eingeschränkt und das Lungenwachstum bei Kindern gestört werden. Es gibt zudem Hinweise darauf, dass eine erhöhte NO₂-Exposition in der Schwangerschaft mit einem niedrigen Geburtsgewicht (beim Kind) und Diabetes Typ 2 in Verbindung steht (Kutlar Joss et al., 2015); (Newhook et al., 2016); (United States. Environment Protection Agency (EPA), 2016). Die Stärke der Evidenz ist jedoch je nach betrachteter Erkrankung unterschiedlich, und für einige gesundheitliche Auswirkungen (wie z. B. Neuerkrankungen an Lungenkrebs) besteht noch Forschungsbedarf.

Beim Feinstaub unterscheidet man zwischen unterschiedlichen Partikelgrößen, die unterschiedlich tief in den Atemtrakt eindringen können. Feinstaub der Partikelgröße PM₁₀ kann beim Menschen durch die Atmung in tiefere Bereiche der Lunge (Bronchien) eindringen. Die kleineren Partikel PM_{2,5} können bis in die Bronchiolen und Lungenbläschen vordringen. Viele epidemiologische Studien zeigen Zusammenhänge zwischen der Morbidität sowie der Mortalität und der Feinstaubbelastung (PM_{2,5} und PM₁₀), z. B. (Rückerl et al., 2011). In mehreren Studien ergeben sich auch Hinweise darauf, dass Feinstaub bei Asthma, chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen (COPD), Diabetes Typ 2, neurodegenerativen Erkrankungen und Lungenkrebs eine Rolle spielen könnte (Guarnieri und Balmes, 2014); (Zheng et al., 2015); (DeVries et al., 2017); (Bowe et al., 2018); (Clifford et al., 2016); (Kioumourtzoglou et al., 2016); (Hamra et al., 2014).

UFP mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 µm erreichen das Lungengewebe, können die Zellmembran durchdringen und in den Blutkreislauf übergehen. Sie sind per Definition auch Bestandteil der Feinstaubfraktionen PM_{2,5} und PM₁₀, sodass Ergebnisse bezüglich dieser Fraktionen auch Effekte des Ultrafeinstaubes durchaus mit einschließen könnten. Die Frage, ob möglicherweise gerade die UFP-Fraktion für die beschriebenen Effekte verantwortlich ist oder darüber hinausgehende eigenständige Wirkungen aufweist, ist allerdings noch weitestgehend ungeklärt. Aufgrund dieser Einschränkung können die Zusammenhänge zwischen PM_{2,5} und PM₁₀ und den gesundheitlichen Effekten nicht direkt auf UFP übertragen werden.

Klinische Studien können Kurzzeitwirkungen von UFP auf den Menschen abbilden. Hierbei wurden Effekte wie Lungenfunktionsstörungen, lokale Entzündungen, aber auch Herz-Kreislauf-Effekte beschrieben. Bei Versuchen in der natürlichen Umwelt ist es generell schwierig, gesundheitliche Effekte nur auf UFP zurückzuführen. Werden gesundheitliche Effekte zum Beispiel nach dem Aufenthalt im Straßenverkehr untersucht, ist es problematisch, die Effekte der UFP von anderen Schadstoffen abzugrenzen oder auch die Effekte einzelnen Staubfraktionen zuzuordnen. Toxikologisch nachgewiesene Auswirkungen von UFP reichen von Schleimhautreizungen und lokalen Entzündungen im Rachen, der Luftröhre und den Bronchien oder Schädigungen des Epithels der Lungenalveolen bis zu verstärkter Plaquebildung in den Blutgefäßen, einer erhöhten Thromboseneigung oder Veränderungen der Regulierungsfunktion des vegetativen Nervensystems (z. B. mit Auswirkungen auf die Herzfrequenzvariabilität).

Die UFP werden von Makrophagen, den natürlichen Reinigungszellen des Immunsystems, nicht immer erkannt und können so in die Lungenzellen, in das Blut oder das lymphatische System übergehen. Dadurch können sie beispielsweise auf das Herz-Kreislauf-System wirken, aber auch andere Körperorgane erreichen. UFP können in den betroffenen Geweben Entzündungen auslösen sowie den Tod von Zellen verursachen. Langfristig können sich u. a. Atemwegs- oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen entwickeln. Letztlich können sie in alle Körperorgane inklusive des Gehirns gelangen. Experimentelle Studien deuten auf einen Zusammenhang von UFP mit kardiovaskulärer und respiratorischer Morbidität und Mortalität sowie der Entstehung von lokalen und systemischen Entzündungsprozessen sowie adversen Effekten auf Gehirn und Stoffwechsel hin (Health Effects Institute, 2013).

Ein aktuelles Sachverständigengutachten im Auftrag des UBA folgert auf Basis der aktuellen epidemiologischen Studienlage, dass trotz der Tatsache, dass seit der letzten Übersichtsarbeit des Health Effects Institutes viele Studien veröffentlicht und damit zahlreiche Hinweise auf Zusammenhänge zwischen einer UFP-Exposition und gesundheitlichen Effekten geliefert worden sind, die Studienlage immer noch keine konsistente Aussage über gesundheitlichen Effekte von UFP erlaubt. Zudem gibt es derzeit nicht ausreichend Studien, welche die für die Berechnung notwendigen Modelle für weitere Luftschadstoffe wie Stickstoffdioxid (NO_2) oder größere Feinstaubpartikel (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) anpassen, wodurch der eigenständige Effekt der UFP über- oder unterschätzt werden kann. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass immer noch nicht-standardisierte Messtechnik zur Bestimmung der UFP-Exposition eingesetzt wird, was eine direkte Vergleichbarkeit der Studien unmöglich macht. Das Sachverständigengutachten folgert auch, dass mehr umweltepidemiologische Langzeitstudien unter Einsatz moderner sowie standardisierter Messmethoden benötigt werden (Ohlwein et al., 2018). Da es an Flughäfen und deren Umgebung eine besondere Belastung durch UFP gibt, sollte zum Schutz der Gesundheit und damit dem Vorsorgeprinzip folgend die Emission von UFP möglichst reduziert werden.

3.4 Fluglärmbelastung und ihre Auswirkungen

3.4.1 Fluglärmbelastung

Gegenwärtige Situation

Die Fluglärmsituation in Deutschland wird von unterschiedlichen, teilweise gegenläufigen Trends geprägt. Beispielhaft genannt sei einerseits die tendenzielle Abnahme der Geräuschemissionen von neu auf den Markt kommenden Luftfahrzeugtypen gegenüber vergleichbaren älteren Luftfahrzeugen, und andererseits der vermehrte Einsatz größerer Luftfahrzeugtypen, die wiederum in der Regel lauter als kleinere Typen sind.

Über die sich insgesamt ergebende Entwicklung der Fluglärmbelastung an Flughäfen in Europa gibt die EU-Umgebungslärmrichtlinie Aufschluss. Nach dieser Richtlinie ist der Lärm in der Umgebung von Hauptverkehrsstraßen, Haupteisenbahnstrecken und Großflughäfen sowie in Ballungsräumen zu ermitteln. Dabei wird unter einem Großflughafen ein Verkehrsflughafen mit über 50.000 Flugbewegungen pro Jahr verstanden. Die erste Lärmkartierung erfolgte im Jahr 2007 und wird seitdem alle fünf Jahre wiederholt. Die Ergebnisse der aktuellen Kartierungsrunde für das Jahr 2017 ergaben, dass an den betrachteten elf Flughäfen in Deutschland ca. 815.000 Personen von Fluglärm bezüglich eines gewichteten 24h-Mittelungspegels²⁷ L_{DEN} von über 55 dB(A) und

²⁷ Beim L_{DEN} (DEN steht für Day-Evening-Night, also Tag-Abend-Nacht) wird der errechnete, über das Jahr gemittelte Teilpegel für den Abendzeitbereich von 18 bis 22 Uhr mit einem Malus von 5 dB und der für die Nacht (22 bis 6 Uhr) mit einem Malus von 10 dB beaufschlagt und mit dem Tagespegel zu einem Wert zusammengefasst.

rund 240.000 Personen mit einem nächtlichen Mittelungspegel²⁸ L_{Night} über 50 dB(A) betroffen²⁹ sind (Tabelle 2).

Tabelle 2: Fluglärm-Betroffene an Großflughäfen in Deutschland 2017 nach EU-Umgebungslärmrichtlinie

Bundesland	Großflughäfen	LDEN > 55 dB(A)	LDEN > 60 dB(A)	LDEN > 65 dB(A)	LDEN > 70 dB(A)	LNight > 50 dB(A)	LNight > 55 dB(A)	LNight > 60 dB(A)
Brandenburg/Berlin	Berlin-Schönefeld	34.600	12.100	400	0	14.000	600	0
Berlin	Berlin-Tegel	278.800	133.900	25.300	2.500	90.200	16.200	1.000
Baden-Württemberg	Stuttgart	35.500	4.500	0	0	1.700	0	0
Bayern	München	13.700	2.900	200	0	3.600	200	0
Bayern	Nürnberg	12.100	1.900	100	0	4.300	200	0
Hessen	Frankfurt am Main	189.300	18.400	0	0	36.700	300	0
Hamburg	Hamburg	63.400	17.600	4.100	200	9.900	1.800	200
Niedersachsen	Hannover-Langenhagen	19.500	4.700	200	0	9.200	1.600	0
Nordrhein-Westfalen	Düsseldorf	56.700	19.600	3.400	1.000	9.800	2.600	0
Nordrhein-Westfalen	Köln/Bonn	101.400	17.700	600	0	53.000	10.600	300
Sachsen	Leipzig/Halle	10.500	2.600	0	0	8.100	2.100	0
Summe		815.500	235.900	34.300	3.700	240.500	36.200	1.500

Quelle: (Umweltbundesamt, 2018)

Kleinere Verkehrsflughäfen, wie z. B. Bremen, Dresden oder Erfurt-Weimar, werden von der Richtlinie nicht erfasst, obwohl auch dort Fluglärmprobleme bestehen. Ebenso werden Landeplätze nicht berücksichtigt, an denen zum Teil ein erheblicher Flugbetrieb mit kleineren Propellerflugzeugen und Motorseglern stattfindet. Weiterhin fehlen in der Zusammenstellung die Personen, die von der Fluglärmbelastung an militärischen Flugplätzen betroffen sind. Die Gesamtzahl der in Deutschland vom Fluglärm betroffenen Menschen liegt somit höher.

²⁸ Beim L_{Night} für die Nacht von 22 bis 6 Uhr wird der errechnete, über das Jahr gemittelte Pegelwert verwendet.

²⁹ Als „Betroffen“ gelten Personen, deren Lärmbelastung (objektiv) im Mittel die jeweiligen Grenzen der Lärmpegel überschreiten. Durch eine erhöhte Anzahl von Flugbewegungen erhöht sich die mittlere Lärmbelastung, womit eine höhere Anzahl von Betroffenen einhergehen kann – ohne dass sich die Anzahl der Menschen, die dort wohnen, verändert. Die Anzahl der Betroffenen kann sich deutlich von der Anzahl derjenigen unterscheiden, die sich subjektiv vom Fluglärm belästigt fühlen (Abschnitt 3.4.2).

Weiterhin ist anzumerken, dass nach der EU-Umgebungslärmrichtlinie grundsätzlich nur L_{DEN} -Pegel über 55 dB(A) bzw. L_{Night} -Pegel von über 50 dB(A) betrachtet werden. Aus Sicht des UBA sind für die Nacht aber Fluglärmbelastungen beachtenswert, die einen L_{Night} von 40 dB(A) erreichen oder überschreiten. Dieser Wert wird auch von der Weltgesundheitsorganisation WHO empfohlen. Würden bei der EU-Lärmkartierung kleinere Pegelwerte berücksichtigt werden, würde dies zu deutlich größeren Belastungsgebieten und im Regelfall auch zu höheren Lärm-Betroffenzahlen führen.

Entwicklungen in der Vergangenheit

Rückblickend betrachtet zeigt ein Vergleich der Gesamtzahl der Personen, die in den Jahren 2012 und 2017 an den betrachteten Verkehrsflughäfen L_{DEN} -Pegeln von über 55 dB(A) ausgesetzt waren, dass die Betroffenzahl im aktuellen Erhebungsjahr bezüglich dieser Lärmbelastung gegenüber dem Jahr 2012 um ca. 10 % gestiegen ist. Ein deutlicher Zuwachs der Betroffenzahl ergab sich auch für die Nachtzeit bei einem L_{Night} von über 50 dB(A) gegenüber dem Jahr 2012 (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Entwicklung der Fluglärm-Betroffenzahlen an Großflughäfen in Deutschland 2017 zu 2012 nach EU-Umgebungslärmrichtlinie

Großflughafen	$L_{DEN} > 55$ dB(A) 2017	$L_{DEN} > 55$ dB(A) 2012	Änderung L_{DEN} 2017 ge- genüber 2012	$L_{Night} >$ 50 dB(A) 2017	$L_{Night} >$ 50 dB(A) 2012	Änderung L_{Night} 2017 gegenüber 2012	Anzahl Flugbe- wegungen Än- derung 2017 gegenüber 2012
Berlin-Schönefeld	34.600	16.100	↑	14.000	6.500	↑	36 %
Berlin-Tegel	278.800	240.500	↑	90.200	54.100	↑	12 %
Stuttgart	35.500	44.200	↓	1.700	5.700	↓	-5 %
München	13.700	11.300	↑	3.600	3.400	↑	-7 %
Nürnberg	12.100	10.500	↑	4.300	3.700	↑	-13 %
Frankfurt am Main	189.300	197.600	↓	36.700	59.800	↓	-5 %
Hamburg-Fuhlsbüttel	63.400	54.200	↑	9.900	4.500	↑	2 %
Hannover-Langenhagen	19.500	18.300	↑	9.200	4.900	↑	0 %
Düsseldorf	56.700	48.300	↑	9.800	8.500	↑	-2 %
Köln/Bonn	101.400	85.000	↑	53.000	45.200	↑	5 %
Leipzig/Halle	10.500	12.000	↓	8.100	9.400	↓	0 %
Summe	815.500	738.000	↑	240.500	205.700	↑	-1 %

Quelle: (Umweltbundesamt, 2018)

Bei der Interpretation der Entwicklung zwischen 2012 und 2017 ist zu beachten, dass die Eingangsdaten der Erhebungsjahre nicht an allen Flughäfen vollkommen vergleichbar sind und diese sich teilweise insbesondere hinsichtlich der Erfassung der Bevölkerungszahlen unterscheiden. Bei der großflächigen Betrachtung der Einwohnerzahlen in der Umgebung der Flughäfen ist der sta-

tistische Effekt zwar vergleichsweise gering, es wird aus diesem Grund hier keine quantitative Veränderung der Fluglärm-Belastetenzahlen an einem Flughafenstandort zwischen den Jahren 2012 und 2017 ausgewiesen.

An den meisten der untersuchten Flughäfen stieg die Anzahl der Betroffenen. Eine Ausnahme bilden die Flughäfen Stuttgart, Frankfurt/Main und Leipzig/Halle, wo die Betroffenzahlen unterschiedlich stark zurückgingen. Während am Flughafen Frankfurt/Main hauptsächlich der Rückgang der nächtlichen Flugbewegungen (-45 %) zu einer Abnahme der Anzahl der Belasteten führte (Lochmann, 2017), war es am Flughafen Leipzig/Halle vor allem der starke Rückgang der schweren Propellerflugzeuge (ca. -95 %) (Wollmann, 2017). Es ist anzunehmen, dass am Flughafen Stuttgart die geringeren Flugbewegungszahlen (-5 %) im Zusammenhang mit der Abnahme der Betroffenzahlen stehen (Statistisches Bundesamt, 2013), (Statistisches Bundesamt, 2018b).

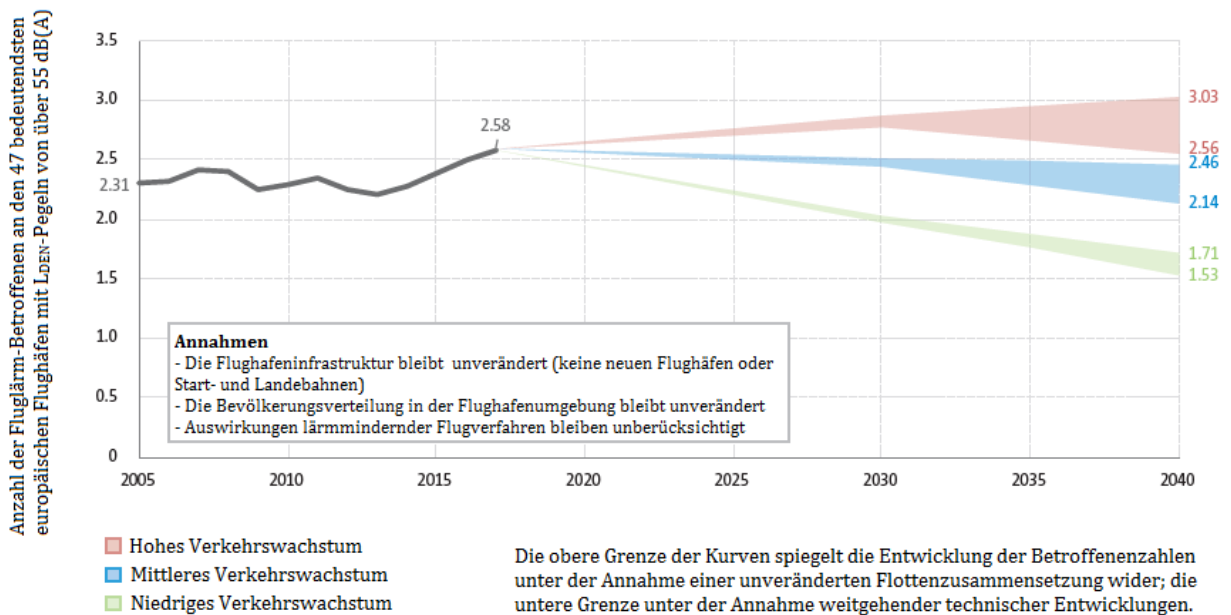
Die Ursachen für die überwiegend steigenden Betroffenzahlen an den Verkehrsflughäfen sind vielfältig. Die wesentlichen Einflussfaktoren bei der Fluglärmrechnung ergeben sich aus der Anzahl der Flugbewegungen der jeweiligen Luftfahrzeugklassen, den Flugverfahren und der Verteilung der Flugbewegungen nach Zeitabschnitt. So erhalten Flugbewegungen am Abend und während der Nacht Aufschläge und haben daher deutlich mehr Einfluss auf den L_{DEN} als Flugbewegungen am Tag. Es lässt sich feststellen, dass sich der Flottenmix teils von kleineren Flugzeugen der AzB-Klasse S 5.1 bis 50 t (Business-Jets) hin zu größeren Flugzeugen der Klassen S 5.2 (Airbus 320, Boeing 737-800) und S 6.1 (A350, B777, B787) verschiebt. Dies betrifft beispielsweise die Flughäfen Hamburg, Düsseldorf, Köln/Bonn und München.

Weiterhin lässt sich auch beobachten, dass an manchen Flughäfen (z. B. München und Nürnberg) die Anzahl von Fluglärm betroffener Personen gestiegen ist, obwohl im selben Zeitraum die Flugbewegungszahlen sanken und auch die von der 55 dB-Kontur eingeschlossene Fläche nahezu konstant blieb. Zwar ergeben sich gewisse Schwankungen bei der Erfassung der Betroffenen aus der Art und Detaillierung der Bevölkerungsverteilung. Bei einem Zuwachs der Betroffenzahlen von ca. 15 % (Nürnberg) bis ca. 20 % (München) ist in diesem Fall aber auch von einem Zuzug in betroffene Gebiete und/oder einer Verschiebung der Konturen von unbesiedelten zu besiedelten Gebieten auszugehen. Anhand dieser Fälle zeigt sich auch, dass ein Rückgang der Flugbewegungen nicht zwangsläufig zu einer Abnahme der von Fluglärm betroffenen Fläche führt. Durch einen höheren Anteil an Nachtflügen bzw. vermehrten Einsatz schwerer Luftfahrzeuge blieb diese nahezu unverändert.

Zukünftige Fluglärmsituation

Zwar liegen derzeit keine Prognosen zur zukünftigen Fluglärmsituation in Deutschland vor, für die bedeutendsten europäischen Flughäfen hat die European Aviation Safety Agency (EASA) jedoch Berechnungen anstellen lassen, die in Abbildung 15 dargestellt sind. Die Lärm-Betroffenzahlen beziehen sich auf die Gesamtzahl der Personen, die an den 47 bedeutendsten europäischen Flughäfen L_{DEN} -Pegeln von über 55 dB(A) ausgesetzt sind. Hierbei wurde angenommen, dass die Flughafen-Infrastruktur unverändert bleibt (keine neue Flughäfen oder Start-/Landebahnen), die Bevölkerungsverteilung im Flughafenumfeld konstant ist und keine lärmoptimierten An- oder Abflugverfahren geflogen werden.

Abbildung 15: Anzahl der Fluglärm-Betroffenen an den 47 bedeutendsten europäischen Flughäfen mit L_{DEN} -Pegeln von über 55 dB(A) seit 2005 und Prognosen bis 2040



Quelle: (European Aviation Safety Agency (EASA) et al., 2019)

Es werden hierbei drei verschiedene Szenarien ab 2017 betrachtet, die sich jeweils in der Entwicklung der Verkehrsleistung unterscheiden sowie eine Bandbreite zwischen zwei Pfaden der Technologieentwicklung aufzeigen: Die obere Grenze der Bandbreite bildet ein Szenario, das von einer unveränderten Flottenzusammensetzung („frozen technology scenario“) ausgeht; die untere basiert auf einem Szenario, in dem ein zunehmender Anteil moderner Luftfahrzeugtypen ältere Typen ersetzt („advanced technology scenario“). Im von der EASA als am wahrscheinlichsten angenommenen Szenario mit mittlerem Verkehrswachstum nimmt die Lärmbelastung im „frozen technology scenario“ bis 2040 geringfügig ab (etwa -5 %), selbst im „advanced technology scenario“ werden nur 8 % Minderung der Lärmbelastung erreicht (Abbildung 15).

Ähnlich wie bei der Betrachtung der zukünftigen Entwicklung der CO₂-Emissionen in dieser Studie (z. B. Abbildung 8) wird deutlich, dass die Entwicklung der Geräuschbelastung in erster Linie vom Verkehrsaufkommen abhängt und technologische Veränderungen diese Entwicklung nur geringfügig beeinflussen.³⁰

Die unterschiedlichen Varianten der möglichen Flottenentwicklung gehen von konventionellen Luftfahrzeugen aus – im „advanced technology scenario“ von einer Entwicklung hin zu leiseren Flugzeugen. Wenn zukünftig neu entwickelte Überschall-Verkehrsflugzeuge im deutschen Luftraum fliegen werden, ist zu befürchten, dass diese die Fluglärmsituation an einzelnen Flughäfen verschlechtern, weil Überschallflugzeuge ein geringeres Lärminderungspotenzial als Unterschallflugzeuge haben. (Abschnitt 5.1.1.4).

³⁰ Inwiefern diese Berechnung auf Deutschland übertragbar ist, kann nicht abschließend beurteilt werden. Eine detaillierte Deutschland-spezifische Berechnung wäre sicherlich zutreffender. Zudem sollte aktuelle Entwicklungen, wie z. B. der Ersatz des Flughafens Berlin-Tegel durch den neuen Flughafen BER, berücksichtigt werden, was zu einer merklichen Reduktion der Lärm-Betroffenen führen wird. Die Grundaussage, dass das Fluglärmproblem durch neue, leisere Luftfahrzeugtypen nicht gelöst wird, sondern höchsten etwas abgemildert werden kann, gilt aber auch für Deutschland.

Eine weitere, aus Lärmschutzsicht negativ zu beurteilende Entwicklung, ist der zu erwartende vermehrte Einsatz ziviler Drohnen. Dies kann zu einer erhöhten Lärmbelastung im Wohnumfeld oder öffentlichen Raum führen (Abschnitt 5.3.4).

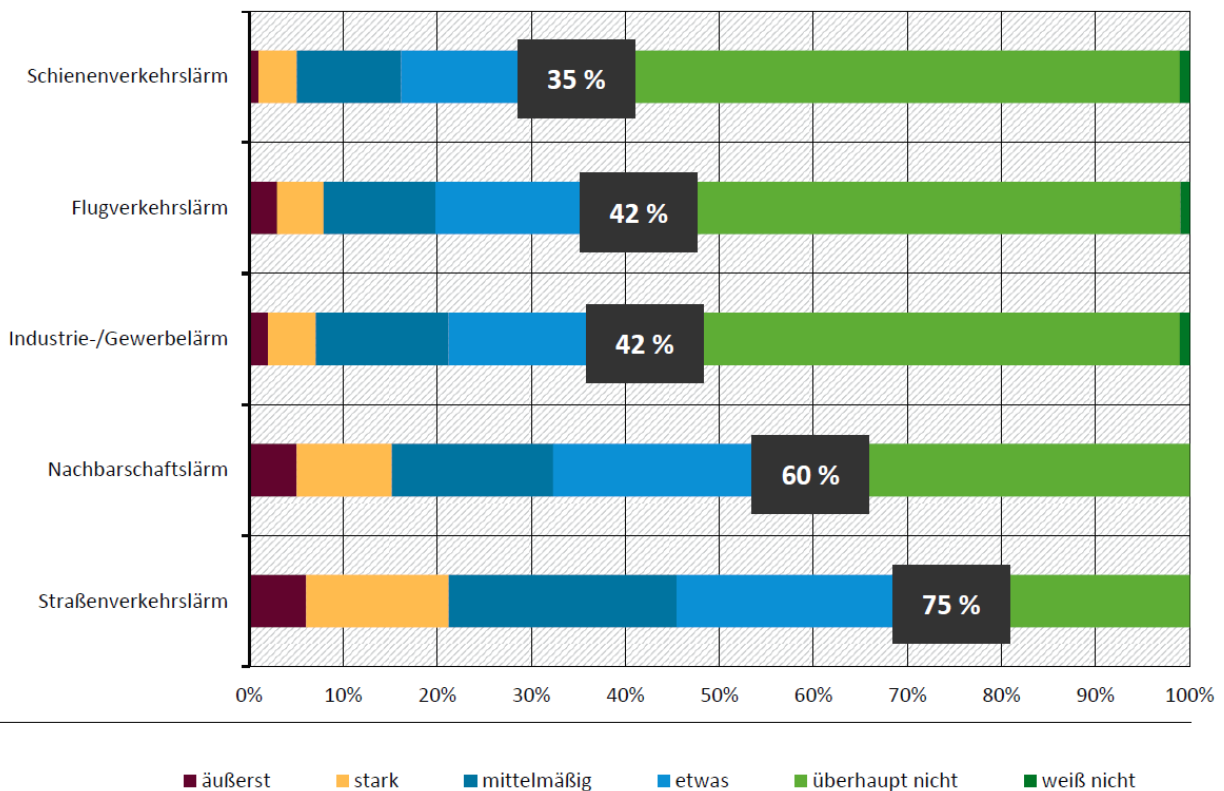
3.4.2 Lärmwirkungen

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, bestehen teilweise erhebliche Fluglärmbelastungen in der Umgebung deutscher Flughäfen. Diese Belastungen können sich negativ auf die Lebensqualität und Gesundheit der dort lebenden Bevölkerung auswirken. Im Einklang mit den Leitlinien der WHO zum Umgebungslärm lassen sich verschiedene Wirkungen von Lärm auf den Menschen differenzieren. Hierzu zählen insbesondere die Lärmbelastung, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlafstörungen und die Beeinträchtigung der kognitiven Entwicklung bei Kindern (World Health Organization, 2011, World Health Organization, 2018). Die folgende Betrachtung orientiert sich an diesen Wirkungen und greift darüber hinaus Ergebnisse zu weiteren Gesundheitswirkungen auf, wie beispielsweise mentalen Erkrankungen.

Belästigung

Das Ausmaß der Lärmbelastung hängt neben der messbaren physikalischen Geräuschbelastung auch von zahlreichen nicht-akustischen Faktoren, wie z. B. der persönlichen Einstellung zu einer Geräuschquelle und der individuellen Empfindlichkeit (Disposition), ab. Die subjektive Lärmbelastung wird alle zwei Jahre im Rahmen einer repräsentativen Befragung zum Umweltbewusstsein in Deutschland anhand einer fünfstufigen Skala (äußerst, stark, mittelmäßig, etwas, überhaupt nicht) erfragt. Nach einer Untersuchung aus dem Jahr 2018 fühlen sich rund 42 % der Befragten zumindest etwas durch Fluglärm belästigt (Scholl et al., 2017). Dies sind weniger Personen im Vergleich zum Straßenverkehrslärm, jedoch mehr als beim Schienenverkehrslärm (Abbildung 16). Nach einer Studie ist Luftverkehr die Verkehrslärmquelle, die bei gleicher Geräuschbelastung als am stärksten belästigend empfunden wird (Miedema und Oudshoorn, 2001).

Abbildung 16: Subjektive Lärmbelästigung in Deutschland im Jahr 2018: Anteil der Befragten nach Belästigungswirkung



Frage: Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate hier bei Ihnen denken, wie stark haben Sie sich persönlich durch den Lärm von folgenden Dingen gestört oder belästigt gefühlt?

Quelle: (Scholl et al., 2017)

Zudem fühlen sich die Menschen in Deutschland bei gleicher akustischer Belastung heute stärker durch Fluglärm belästigt als noch vor zehn bis 15 Jahren (Guski und Schreckenber, 2015); (Guski et al., 2017); (Schreckenber et al., 2015). In Rechtssetzungsverfahren wird häufig ein Wert von 25 % hoch belästigter Personen verwendet, um anhand von Wirkungskurven einen Pegelwert für eine erhebliche Belästigung der Bevölkerung abzuleiten. Dieser Pegelwert ist heute deutlich niedriger als noch vor zehn bis 15 Jahren. So fühlen sich 25 % der vom Fluglärm betroffenen Bevölkerung heutzutage schon bei einem L_{DEN} -Wert von etwa 54 dB(A) hoch belästigt (Guski et al., 2016).

Gesundheitliche Auswirkungen

Lärm mindert nicht nur das subjektive Wohlbefinden und die Lebensqualität, sondern kann auch die körperliche Gesundheit negativ beeinflussen: Die Verarbeitung von Hörschall führt potentiell zu einer Aktivierung des Hormonsystems und des autonomen Nervensystems. Infolgedessen kann sich, bei dauerhafter Lärmeinwirkung, der Blutdruck und die Herzfrequenz verändern sowie der Stoffwechsel und dessen Regulation beeinträchtigt werden. Kardiovaskuläre Risikofaktoren, wie erhöhte Blutzuckerwerte können durch die Lärmwirkung auftreten, wie das Forschungsprojekt SiRENE (Short and Long Term Effects of Transportation Noise Exposure) festgestellt hat.³¹ Dies kann zur Arterienverkalkung beitragen und im Verlauf die Entstehung eines Bluthochdrucks begünstigen und schließlich einen Herzinfarkt auslösen. Aufgrund aktueller Studien zu gesundheitlichen Auswirkungen des Fluglärms ist davon auszugehen, dass bereits ab Tages-Mittelungspegel

³¹ <http://www.sirene-studie.ch>

($L_{Aeq, Tag}$)³² von 55 bis 60 dB(A) beziehungsweise bei Nacht-Mittelungspegel ($L_{Aeq, Nacht}$)³³ von 45 bis 50 dB(A) ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen besteht (Kaltenbach et al., 2016); (Münzel et al., 2014); (Vienneau et al., 2015). Zu diesen Krankheiten gehören Veränderungen des Blutdrucks (Hypertonie und Hypotonie), koronare Herzkrankheiten, Herzinsuffizienz und Myokardinfarkt sowie Schlaganfälle.

Lärm beeinträchtigt darüber hinaus den Schlaf. Dies äußert sich in einer veränderten Schlafstruktur, vermehrten Aufwachreaktionen sowie einer erhöhten Ausschüttung von Stresshormonen. Eine verminderte Schlafqualität und die damit einhergehende erhöhte autonome Reaktion werden mit der Entstehung von Krankheiten (z. B. des Herz-Kreislauf-Systems) und kognitiven Beeinträchtigungen in Verbindung gebracht (Basner und McGuire, 2018). Eine zunehmende Anzahl von Fluglärmereignissen kann die Kontinuität des Schlafs beeinträchtigen.

Darüber hinaus steht Lärm in Zusammenhang mit eingeschränkter Sprachentwicklung und verminderter mentaler Leistungsfähigkeit von Kindern (Clark und Paunovic, 2018). Dies belegen insbesondere zwei Querschnittsanalysen aus Großbritannien (RANCH-Studie 2005, siehe (Clark et al., 2013); (Matheson et al., 2010)) und Deutschland (NORAH-Studie 2014³⁴, siehe z. B. (Guski und Schreckenberg, 2015)). Die Studien zeigen, dass Fluglärm mit eingeschränkter Lesekompetenz und Gedächtnisleistung von Kindern zusammenhängt. Es ist davon auszugehen, dass bei einem Anstieg des Dauerschallpegels um 10 dB(A) bzw. 20 dB(A) der Erwerb der Lesekompetenz um ein bzw. zwei Monate verzögert wird (Klatte et al., 2014); (Stansfeld et al., 2005). Diese Verzögerung mag gering erscheinen, ihre Relevanz zeigt sich jedoch bei einer Betrachtung der Gesamtlernzeit für den Erwerb der Lesekompetenz. Diese erfolgt in der Regel im ersten Schuljahr. Durch die Schuleingewöhnungsphase und die Ferienzeiten bemisst sich die Gesamtlernzeit des ersten Schuljahres auf ungefähr sechs Monate. Eine Lernverzögerung von zwei Monaten bedeutet daher eine Verzögerung um etwa ein Drittel der Gesamtleselernzeit gegenüber Kindern, die nicht durch Lärm am Schulort belastet sind. Derzeit ist unklar, ob und wann die Kinder diese Verzögerung wieder aufholen können.

Lärm kann auch zu dem so genannten metabolischen Syndrom beitragen, das durch stammbetonte Fettleibigkeit, Bluthochdruck, Fettstoffwechselstörung und Diabetes gekennzeichnet ist (Eriksson et al., 2014); (Sørensen et al., 2013). Bislang liegen erst wenige Studien vor, die einen Zusammenhang zwischen Lärm und psychischen Erkrankungen untersucht haben (Beutel et al., 2016); (Greiser und Greiser, 2014); (Seidler et al., 2015). Diese deuten auf einen Anstieg der Auftretenshäufigkeit von affektiven Störungen, insbesondere der depressiven Episode, bei steigenden Geräuschpegeln hin. Um die Erkenntnisse auf diesem Gebiet zu vertiefen, wird zurzeit eine Studie im Auftrag des UBA durchgeführt.

Empfehlungen der WHO

Basierend auf hier genannten Studien sowie weiteren Untersuchungen hat die WHO im Oktober 2018 aktuelle Leitlinien zum Umgebungslärm veröffentlicht. Darin empfiehlt die WHO, dass zum Schutz vor Fluglärm ein L_{DEN} -Wert von 45 dB(A) und ein L_{night} -Wert von 40 dB(A) eingehalten werden sollen (World Health Organization, 2018). Diese Empfehlungen unterstützt das UBA, um die Bevölkerung vor negativen Auswirkungen des Lärms auf die menschliche Gesundheit zu schützen.

Um die unterschiedlichen gesundheitlichen Effekte von Lärm darstellen und miteinander vergleichen zu können, wird in der vorliegenden Studie das von der WHO entwickelte Maß zur Quantifi-

³² Über ein Jahr gemittelter Schalldruckpegel für den Tag-Zeitraum von 6 bis 22 Uhr, frequenzkorrigiert anhand der A-Filterkurve.

³³ Über ein Jahr gemittelter Schalldruckpegel für den Nacht-Zeitraum von 22 bis 6 Uhr, frequenzkorrigiert anhand der A-Filterkurve.

³⁴ <http://www.laermstudie.de>

zierung verlorener gesunder Lebensjahre (disability-adjusted life year, DALY) verwendet. Ein Vorteil der Einheit DALYs ist, dass die durch vorzeitigen Tod verlorenen Lebensjahre (Years of life lost due to premature mortality, YLL) und die mit gesundheitlicher Einschränkung gelebten Lebensjahre (Years lived with disability, YLD) aufsummiert, und so Gesundheitsverluste für Bevölkerungen bzw. Bevölkerungsgruppen umfassend und vergleichbar dargestellt werden können. Es wurden für Deutschland DALYs für ischämische Herzerkrankungen, Schlafstörungen und erhebliche Lärmbelastigung³⁵ berechnet, da für diese aussagekräftige epidemiologische, d. h. bevölkerungsbezogene Beobachtungsstudien, vorlagen. Details zur Berechnung können der Publikation „Burden of Disease Due to Traffic Noise in Germany“ entnommen werden (Tobollik et al., 2019).

Der größte Teil der Krankheitslast aufgrund von Fluglärm im Jahr 2016 ist auf ischämische Herzerkrankungen zurückzuführen, für die die Berechnungen rund 89.200 DALYs ergaben (Tabelle 4). Dabei ist hervorzuheben, dass die Evidenz zum Zusammenhang zwischen Fluglärm und ischämischen Herzerkrankungen als niedrig bewertet wurde und daher weitere Studien die Ergebnisse verändern können (Van Kempen et al., 2018). Der Mortalitätsanteil mit rund 57.500 verlorenen Lebensjahren nimmt etwa zwei Drittel dieser Krankheitslast ein. Die breiten Konfidenzintervalle, die bei den DALYs von 0 bis 246.400 reichen, zeigen die Unsicherheit der berechneten Krankheitslast.

Für erhebliche Belästigung und Schlafstörung durch Fluglärm wurden nur die mit gesundheitlicher Beeinträchtigung gelebten Lebensjahre (YLD) berechnet, da davon auszugehen ist, dass beide Beeinträchtigungen nicht direkt zum Tod führen. Durch Fluglärm fühlen sich rund 283.200 Personen in Deutschland erheblich belästigt, was zu rund 5.700 DALYs führt. Die Berechnungen haben darüber hinaus ergeben, dass rund 55.800 Personen unter Schlafstörungen leiden, die in Zusammenhang mit Fluglärm stehen. Dies ergibt rund 3.900 DALYs.

Die Ergebnisse beruhen auf Modellrechnungen, die zur Einordnung der Krankheitslast von Fluglärm in Deutschland dienen. Sie sind mit den in Tabelle 4 angegebenen Unsicherheiten behaftet. Es kann hierbei zu einer Unterschätzung kommen, da die Berechnungen auf den Expositionsdaten der EU-Umgebungslärmrichtlinie für das Bezugsjahr 2016 basieren, die für Fluglärm nur Ballungsräume und Großflughäfen umfasst.

Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung der Krankheitslasten durch Fluglärm

	Evidenz (Quelle)	YLDs: mit gesundheitlicher Einschränkung gelebte Lebensjahre	YLLs: durch vorzeitigen Tod verlorenen Lebensjahre	DALYs: verlorene gesunde Lebensjahre
Ischämische Herzerkrankungen (ICD I20-I25)	Niedrig (Van Kempen et al., 2018)	31.773(0-94.953)*	57.462(0-151.475)*	89.236 (0-246.429)*
Belästigung	Moderat (Guski et al., 2017)	5.669 (2.834-34.011)#	-	5.669 (2.834-34.011) #
Schlafstörung	Moderat (Basner und McGuire, 2018)	3.906 (2.232-5.580)#	-	3.906 (2.232-5.580)#

Werte basieren auf den Ergebnissen der Lärmkartierung nach der EU-Umgebungslärmrichtlinie für das Bezugsjahr 2016.

*berechnetes Konfidenzintervall basierend auf dem 95 % Konfidenzintervall der zugrundeliegenden Expositions-Wirkungsfunktion; #berechnetes Konfidenzintervall basiert auf einem niedrigeren und einem höheren Gewichtungsfaktor für

³⁵ Die Berechnung der Krankheitslast bezieht sich auf erhebliche Lärmbelastigung und ist somit nicht mit den Ergebnissen der zuvor genannten Umweltbewusstseinsstudie 2018 vergleichbar, die auch schwächere Formen der Lärmbelastigung berücksichtigt.

die gesundheitliche Beeinträchtigung
Quelle: (Tobollik et al., 2019)

3.5 Weitere Umweltbelastungen

3.5.1 Flächeninanspruchnahme

Flughäfen benötigen Fläche, insbesondere für Start- und Landebahnen nebst Vorfeld, Hangars zur Wartung und Reparatur von Luftfahrzeugen, Anlagen der Flugsicherung sowie Flughafengebäude zur Abfertigung von Passagieren und Fracht und die Verwaltung des Flughafensbetreibers und der Fluggesellschaften. Damit Flugzeuge sicher starten oder landen können, muss das Umfeld der Start- und Landebahnen hindernisfrei sein. Auch diese Sicherheitsflächen tragen noch einmal wesentlich zur Flächeninanspruchnahme der Flughäfen bei. Abbildung 17 veranschaulicht diese Flächeninanspruchnahme am Beispiel des Flughafens Frankfurt/Main.

Hinzu kommt anteilig die Verkehrsanbindung nach außen, d. h. Zufahrtsstraßen und Parkplätze, Bushaltestellen und gegebenenfalls auch ein Bahnhof und anteiliger Schienenanschluss. Der Neubau oder die Erweiterung von Flughäfen induziert somit weiteren Flächenverbrauch im Umfeld und in der Region.

Abbildung 17: Luftbildaufnahme des Flughafens Frankfurt/Main, Hervorhebung der Flughafengrenze



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Basis-DLM (AAA) und DOP20 © GeoBasis-DE / BKG 2019

Die amtliche Flächenstatistik weist für den Luftverkehr im Jahr 2017 eine Fläche von 376 km² aus (Statistisches Bundesamt, 2018a). Ab 2016 umfasst dies sowohl Verkehrsflächen als auch Gebäude- und Betriebsflächen für den Luftverkehr. Durch Vergleich mit Daten früherer Jahre lässt sich

ableiten, dass von der Flughafenfläche etwa 315 km² (84 %) Verkehrsflächen und 61 km² (16 %) Gebäude- und Betriebsflächen sind. Der prozentuale Anteil der Gebäude- und Betriebsflächen dürfte bei stark frequentierten Verkehrsflughäfen höher liegen, bei kleinen Flughäfen und Landeplätzen deutlich niedriger.

Für die 25 deutschen Verkehrsflughäfen mit jährlich mindestens 200.000 Passagieren beträgt die Gesamtfläche aller Flughafengelände nach Berechnungen des Umweltbundesamtes 142 km². Davon nimmt die Fläche aller Start- und Landebahnen mit rund 5 km² etwa 4 % der Flughafenfläche ein. Hinzu kommen jedoch mit rund 24 km² für Vorfeld und seitliche Befestigungsfläche der (Start-/Lande-)Bahnen weitere versiegelte Flächen, d.h. allein die für das Bewegen und Parken der Luftfahrzeuge benötigten versiegelten Flächen betragen insgesamt rund 21 % des Flughafengeländes (29 km²). Berücksichtigt man auch noch die Flughafengebäude, Hangars und sonstige Gebäude und Anlagen, so erhöht sich der Anteil versiegelter Flächen auf dem Flughafengelände um ca. 20 %-Punkte (28 km²). Bei den 25 betrachteten Verkehrsflughäfen dürfte der versiegelte Anteil des Flughafengeländes im Mittel bei 40 % (ca. 58 km²) liegen.

Darüber hinaus gibt es weitere 13 kleine Regionalflughäfen. Die Fläche ihrer Start- und Landebahnen beträgt nach eigenen Berechnungen zusammengenommen rund 1,5 km², ihre Gesamtfläche lässt sich auf ca. 43 km² schätzen. Der Anteil der insgesamt für Flugbewegungen versiegelten Fläche beläuft sich auf etwa 15 % der Gesamtfläche, d.h. rund 6 km². Hinzu kommen auch hier versiegelte Gebäude- und Betriebsflächen (ca. 20 % der Gesamtfläche). Ein Teil dieser Flughäfen wird auch für militärische oder private Flüge genutzt, sodass ihre Fläche nicht allein dem gewerblichen Luftverkehr zugeordnet werden kann.

Die Gesamtfläche aller 38 betrachteten Flughäfen in Deutschland beträgt etwa 185 km². Bezogen auf die Gesamtfläche gemäß amtlicher Statistik, entfallen somit weitere 191 km² auf ca. 950 kleinere Flugplätze, die nur zum Teil für den gewerblichen Luftverkehr und ansonsten für sportliche oder private Zwecke oder für Rettungsdienste genutzt werden: davon sind ca. 390 Landeplätze, ca. 230 Hubschrauberlandeplätze, ca. 270 Segelfluggelände und ca. 70 Ultraleichtfluggelände (Statistisches Bundesamt, 2018b). Vergleicht man die Flächeneffizienz, also das Passagier- und Frachtaufkommen pro Hektar, der 25 Verkehrsflughäfen und der 13 kleinen Regionalflughäfen, dann zeigen sich eklatante Unterschiede. Auf den großen Verkehrsflughäfen werden im Mittel pro ha Fläche und pro Jahr ca. 1.900 Tonnen-Äquivalente abgewickelt, d.h. 1.900 Tonnen Fracht oder 19.000 Passagiere. Bei den kleineren Regionalflughäfen ist es nur rund ein Hundertstel, nämlich 20 Tonnen-Äquivalente pro ha und Jahr. Die Anzahl der Flugbewegungen pro Fläche unterscheidet sich um den Faktor 4: Das sind im Mittel 157 Flugbewegungen pro ha und Jahr an den 25 Verkehrsflughäfen und durchschnittlich 41 Flugbewegungen pro ha und Jahr bei den 13 kleinen Regionalflughäfen. Die Mittelwerte verdecken, dass es auch innerhalb dieser beiden Kategorien große Unterschiede in der Flächeneffizienz der Flughäfen gibt und auch bei einigen der 25 Verkehrsflughäfen das Verhältnis von Flächenverbrauch und Nutzen ungünstig ausfällt. Insbesondere bei kleineren Flugplätzen ist die Flächeneffizienz relativ gering.

3.5.2 Ressourcenverbrauch durch den Luftfahrzeugbau

Nicht zuletzt aufgrund ihres anspruchsvollen, hohen Fertigungsniveaus werfen vor allem die Flugzeuge selbst immer wieder Materialfragen auf. Nach Erkenntnissen aus UBA-Untersuchungen zum Einsatz von Titanlegierungen in Triebwerken, Scandium-Aluminiumlegierungen in Flugzeugzellen und seltenen Erden wie Yttriumoxid für Hitzeschutzkeramiken von Triebwerken sind die Mengenströme in den betrachteten Fällen im Vergleich zu den übrigen Anwendungen allerdings sehr gering. Eine Ökobilanz für einen Airbus A330-200 zeigt, dass dieses Flugzeug zu rund 58 % aus Aluminium, zu 19 % aus Stahl und 9 % aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen besteht. Weitere verwendete Materialien sind Titan (8 %), Nickel (3 %), Glasfaser-verstärkter Kunststoff (1 %) und sonstige, nicht weiter spezifizierte Materialien (2 %) (Lopes, 2010). Die Materialzu-

sammensetzung bezieht sich dabei auf das Hersteller-Leergewicht (MEW – Manufacturer’s Empty Weight) des Flugzeugs von 106 t, das beispielsweise Sitze und Ausrüstung für Catering noch nicht berücksichtigt.

Diese Analyse macht deutlich, dass in Flugzeugen durchaus größere Mengen an umweltrelevanten Rohstoffen (z. B. Aluminium, Stahl, Kunststoffe) neben den Spezialwerkstoffen wie Titan, Scandium oder Yttriumoxid zum Einsatz kommen, die es bewusst einzusetzen gilt. Da allerdings Flugzeuge Jahresflugleistungen von mehr als 2 Mio. km pro Jahr erbringen und im Durchschnitt 25 Jahre im Einsatz sind, sind die Umweltbelastungen pro geflogenem km bzw. pro Pkm im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln gering. So entfällt nach einer Analyse im Auftrag des UBA der Großteil der spezifischen Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs in Deutschland pro Pkm unter Einbezug des Baus, Unterhalts und Betriebs der Luftverkehrsinfrastruktur sowie des Baus und Unterhalts der Flugzeuge auf die Verbrennung und Herstellung des Kerosins, d. h. auf den Flugbetrieb (Mottschall et al., 2013). Im Passagierluftverkehr entstanden im Jahr 2008 bezogen auf einen Passagierkilometer zwischen 90 und 97 % der Treibhausgasemissionen (berechnet als CO₂-Äquivalente, CO_{2e}) durch den Flugbetrieb, nur 0,01 bis 0,02 % durch den Bau und Unterhalt der Flugzeuge. Relevanter sind in Bezug auf die Treibhausgasemissionen der Bau, Unterhalt und Betrieb der Luftverkehrsinfrastruktur – auf diese Bereiche entfallen immerhin 3 bis 10 % der Treibhausgasemissionen. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch im Luftfrachtbereich.

Im Sinne einer Kostenoptimierung wird aber an anderen Stellen im Luftfahrzeugbau die Ressourceneffizienz bereits erhöht. So etwa durch den häufigen Einsatz runderneuerter Reifen und den Versuch, die Reichweiten und damit den funktionalen Nutzen in Personenkilometern durch leichtere Materialien zu erhöhen. Grundsätzlich ist aber festzustellen, dass es gerade in Bezug auf den Ressourcenverbrauch des Luftverkehrs weiterer Untersuchungen bedarf, um eine solide Informations- und Wissensbasis bereitstellen zu können.

3.5.3 Auswirkungen auf die Wasser- und Bodenqualität

Der weltweite zivile Luftverkehr trägt durch seine CO₂-Emissionen zur Ozeanversauerung bei. Nachteilige Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Qualität der flughafennahen Gewässer sind in der Regel aber nur zu erwarten, wenn wassergefährdende Stoffe eingesetzt werden.

Damit ein sicherer Flugbetrieb gewährleistet ist, müssen sowohl die Flugzeuge als auch die Betriebsflächen im Winter eisfrei gehalten werden. Hierfür werden an Flughäfen flüssige Enteisungsmittel, meist aus wassermischbaren Polyalkoholen mit geringer Flüchtigkeit (z. B. Propylenglykol oder Diethylenglykol) und Heißwasser, aber auch Streusalze eingesetzt. Das Ausbringen von Enteisungsmitteln führt zu Abwasser, das mit leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen, aber auch Salzen und Schadstoffen verunreinigt ist. Würde dieses Abwasser ungereinigt in natürliche Gewässer gelangen, so käme es dort zu Sauerstoffentzug und Schadstoffbelastungen und damit zu einer Belastung der Gewässerfauna sowie Beeinträchtigungen anderer Nutzungen. Gleiches gilt für unversiegelten Boden, in dem Pflanzen und Bodenorganismen geschädigt werden könnten. Deshalb sind diese Abwässer gesondert aufzufangen und entsprechend abwassertechnisch zu behandeln, was an deutschen Flughäfen in der Regel auch erfolgt. Spezielle Bodenfilter, die auf vielen Flughäfen neben den befestigten Betriebsflächen installiert sind, sorgen dafür, dass Abwasser, das durch Wind oder anderweitig in diese Bereiche transportiert wird, nicht in das Grundwasser eingetragen wird.

Auch der Einsatz von Löschsäumen, die poly- und perfluorierte Chemikalien (PFC) enthalten, kann nachteilige Auswirkung auf die Gewässerqualität an Flughäfen mit sich bringen. Insbesondere zur Bekämpfung von Bränden der Brandklasse B (Brände von Flüssigkeiten und schmelzenden Feststoffen) werden derartige Feuerlöschmittel eingesetzt. Fluorhaltige Schaumlöschmittel sind auch besser bekannt als AFFF (wasserfilmbildende Schaumlöschmittel) bzw. AFFF-AR (wasser-

filmbildende Schaumlöschmittel - alkoholbeständig) oder FFFP (filmbildende Fluor-Proteinschaummittel). Diese Chemikalien können in Kläranlagen nicht abgebaut werden. Vielmehr entstehen in Kläranlagen durch verschiedene Umwandlungsprozesse aus den abbaubaren Vorläuferverbindungen (polyfluorierte Chemikalien) zusätzliche nicht abbaubare perfluorierte Chemikalien (PFC). Wasserlösliche PFC werden über Flüsse und Meeresströmungen sogar global verteilt. Mittlerweile gibt es aber eine Reihe von Neuentwicklungen, die gute Löscherfolge auch auf Basis von fluortensidfreien Schaummitteln sicherstellen und so haben einige Flughäfen bereits auf fluorfreie Löschsäume umgestellt, darunter auch internationale Flughäfen, wie der Flughafen London-Heathrow.

3.5.4 Auswirkungen auf die biologische Vielfalt

Der Luftverkehr hat vielfältige Auswirkungen auf die biologische Vielfalt, weshalb hier nur ausgewählte Aspekte näher betrachtet werden können. So wirkt der Luftverkehr als Emittent von Treibhausgasen mittelbar auf die biologische Vielfalt ein, denn Klimaänderungen infolge der Freisetzung von Treibhausgasen gehören zu den wesentlichen Gefährdungsfaktoren der Biodiversität (Umweltbundesamt, 2015). Auch durch den Luftverkehr verursachte Luftschadstoffemissionen stellen aufgrund ihrer Belastung von Böden, Wasser und Luft eine überwiegend mittelbare Gefahr für empfindliche Arten und Lebensräume dar. Das trifft insbesondere auf das nähere Umfeld der Flughäfen zu, wenn sich dort Habitate befinden, die gegenüber diesen Einträgen besonders empfindlich sind.

Zu den unmittelbaren Wirkungen des Luftverkehrs auf die Artenvielfalt zählen akustische und optische Signale von Luftfahrzeugen, die Störreize für die Tierwelt darstellen (Scholze und Klaassen, 2009); (Komenda-Zehnder und Bruderer, 2002). So sind Lichtemissionen geeignet, Tiere anzulocken, wodurch sie von Prädatoren leichter erbeutet werden können (Scholze und Klaassen, 2009); (Müller-Wenk, 2002). Auch Geräuschemissionen können lokale Populationen beeinträchtigen. Akustische Störreize können etwa die akustische Orientierung von Fledermäusen beeinflussen. Lärmbedingt können Beutetiere nicht mehr verortet werden, deren Frequenzbereiche sich mit dem Verkehrslärm überlappen (Brinkmann et al., 2012). Vor allem die dauerhafte Beschallung steht im Verdacht, die Kommunikation diverser Arten nachhaltig zu stören, beispielsweise in Form einer Überdeckung von Lockrufen oder einer lärmbedingten Änderung des Singverhaltens der in der betroffenen Region lebenden Vogelarten (Avifauna) (Dominoni et al., 2016); (Gil et al., 2015). Um diese Auswirkungen zu verringern, wären Flugpausen notwendig, die sich an Tages-, Jahres- und Arten-spezifischen Schutzzeiten orientieren. Gerade im Frühjahr zur Brutzeit reagiert die Avifauna empfindlich auf Störungen (Scholze und Klaassen, 2009); (Scholze, 2007).

Die Intensität der Einwirkungen durch den Luftverkehr auf die biologische Vielfalt ist abhängig von artspezifischen Verhaltensweisen und Empfindlichkeiten. Störradien und Fluchtdistanzen variieren je nach Art und bemessen sich danach, ob und wann auf Feinde reagiert werden kann (Garniel und Mierwald, 2010). Entsprechend entstehen Beeinträchtigungen durch den Luftverkehr dann, wenn eine Art den Störungen nicht angemessen begegnen kann. Die Erheblichkeit der Auswirkungen des Luftverkehrs bemisst sich folglich nach seinem zeitlichen und räumlichen Auftreten. Stress, Desorientierung und ein infolge von Fluchtreaktionen erhöhter Energiebedarf sind nur einige mögliche Folgen einer zu geringen Distanz zwischen Luftfahrzeugen und Tierwelt (Scholze und Klaassen, 2009); (Komenda-Zehnder und Bruderer, 2002).

Gerade für die Avifauna ist auch der Überflug ein bedeutender Wirkfaktor (Scholze, 2007). Insbesondere Kunstflüge, kreisende Flugbahnen oder wechselnde Flughöhen sind für Tiere nur schwer einschätzbar (Scholze und Klaassen, 2009). Besonders bei niedrig fliegenden Luftfahrzeugen, die Rast- und Äsungsflächen von Zugvögeln queren, besteht die Gefahr des Vogelschlags. Aber selbst bei einer Flughöhe von über 600 m kann es zu Kollisionen von Vögeln mit Luftfahrzeugen kom-

men (Faulstich et al., 2014). Tiefe Überflüge stellen für einige Arten eine derartige Störung dar, dass sich Überlebenschancen verringern oder Bruterfolge gefährdet sein können (Balzer, 2005).

Die Störwirkung variiert je nach Luftfahrzeugart: Hubschrauber, Heißluftballons sowie kleine wendige Flugzeuge weisen ein vergleichsweise hohes Störpotenzial auf (Bruderer und Komenda-Zehnder, 2005); (Frenz und Muggenborg, 2017). So können Flüge mit kleinen Propellerflugzeugen zu teils häufigen Störungen rastender Vögel führen (Jödicke et al., 2018). Folglich müssen die unterschiedlichen Luftfahrzeugarten und die Häufigkeit ihres Auftretens vorab identifiziert und bei der Planung beachtet werden.

Auch die Beschaffenheit der Lebensräume beeinflusst die Intensität der Störungen. Demnach können hochwertige Lebensräume und günstige Vegetationsstrukturen eine Schutzfunktion erfüllen und die Wirkungen von Störreizen verringern (Scholze und Klaassen, 2009); (Garniel et al., 2007). Entsprechend sind mit der Anlage oder Änderung von Flugplätzen verbundene Eingriffe in die Natur und Landschaft sowie Flächenversiegelungen zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Unabhängig davon, wie sich Geräusch- und Lichtemissionen auf den Fortbestand der Arten auswirken, ist die Zerstörung oder Fragmentierung von Habitaten die größte Bedrohung biologischer Vielfalt (McGregor et al., 2013).

Kleine Flugplätze sind aber auch oft geprägt von überwiegend unversiegelten und nicht gedüngten Mager- und Trockenrasenflächen (Scholze und Klaassen, 2009); (Scholze, 2007); (Hild und Morgenroth, 2004). Zudem weisen sie als Folge der wenigen Düngung und geringen Biomasseproduktion einen niedrigen Aufwuchs auf (Hild und Morgenroth, 2004). Insofern können Flugplätze wertvolle Lebensräume für teilweise seltene Tier- und Pflanzenarten sein, die offene und ertragsarme Standorte bevorzugen (Klages et al., 2010). Zudem bieten die oftmals eingezäunten Gelände Schutz vor bestimmten natürlichen Feinden. Der Bau von Verkehrsflächen führt jedoch zu einem Verlust von Lebensräumen (Hornberg et al., 2018). Eine weitere Verdrängung wertvoller Biotop im Zuge von Flugplatzweiterungen kann den Erhaltungszustand hierauf spezialisierter Arten verschlechtern.

3.5.5 Wirkung von Treibstoffschnellablass auf Umwelt und Gesundheit

Gibt es nach dem Start technische Probleme am Flugzeug oder muss ein Fluggast akut medizinisch behandelt werden, muss der Flug vorzeitig abgebrochen werden. Ist zu diesem Zeitpunkt noch zu viel Kerosin im Tank und das Flugzeug zu schwer zum Landen, muss aus Sicherheitsgründen ein Teil davon noch in der Luft abgelassen werden. Dies kam in Deutschland im Zeitraum 2012 bis 2016 im Durchschnitt 20-mal pro Jahr vor. Dabei wurden im Schnitt 516 t Kerosin pro Jahr abgelassen. Die Tendenz ist – trotz steigender Zahl der Flugbewegungen – rückläufig: Im Vergleich zum Zeitraum 2002 bis 2006 ging die Zahl der jährlichen Treibstoffschnellablässe um 45 % zurück, die Menge des pro Jahr abgelassenen Kerosins um 35 % (Wetzel, 2019).

Bei einem solchen Treibstoffschnellablass wird das Kerosin in einer Flughöhe von mindestens 1.800 m in feine Tröpfchen zerstäubt, sodass ein Großteil des Kerosins noch in der Luft verdunstet. Im Rahmen eines Forschungsprojekts des UBA, wurden vier fiktive Worst-Case-Szenarien untersucht, die sich hinsichtlich der Bodentemperatur und damit den Rahmenbedingungen für die Verdunstung des Kerosins unterscheiden (Hiester et al., 2019). Zusätzlich wurde vom UBA ein weiteres, realitätsnahes Szenario „Pfalz 2017“ untersucht, welches sieben von neun gemeldeten Treibstoffschnellablässen über Rheinland-Pfalz im Jahr 2017 und die realen Wetterbedingungen berücksichtigt (Wetzel, 2019).

Die Modellierungen der am Boden ankommenden Kerosinrückstände sowie die umwelttoxikologischen Untersuchungen des UBA und seiner Auftragnehmer ergaben nach derzeitigem Wissensstand keine kritischen Umweltauswirkungen von Treibstoffschnellablässen auf Boden, Grundwasser, Luft und menschliche Gesundheit. Beispielsweise gelangt im ungünstigsten Fall pro Kero-

sinschnellablass 0,18 ng Benzo[a]pyren (BaP) pro m² auf den Boden. Zum Vergleich: Der geplante Depositionsgrenzwert in der novellierten TA Luft (Schutzniveau Kinderspielplatz) für BaP liegt bei täglich 500 ng/m². Auch Vergleiche mit anderen umweltrelevanten Stoffen zeigen, dass Grenz- und Richtwerte für die Bereiche Wasser, Boden, Luft und menschliche Gesundheit bei den pro Jahr stattfindende Kerosinschnellablassen eingehalten werden können (Schmied, 2019).

Zur Vermeidung von Summationswirkungen empfiehlt das UBA allerdings nach dem Vorsorgeprinzip eine Vorschrift zu möglichst alternierenden Ablassgebieten in die Betriebsanweisung der Deutschen Flugsicherung (BA-FVD 665.2) aufzunehmen. Die Entscheidung, ob ein Treibstoff-schnellablass durchgeführt wird, liegt zwar beim Piloten, die Flugsicherung entscheidet jedoch, welches Gebiet für den Ablass zugewiesen wird (Wetzel, 2019).

4 En Route zu einem umweltschonenden Luftverkehr – Vision des Umweltbundesamtes

Der Luftverkehr verursacht vor allem durch Lärm- und Treibhausgasemissionen, aber auch durch Luftschadstoffe, Flächen- und Ressourcenverbrauch Umweltprobleme, die aufgrund des weiter hohen Luftverkehrswachstums in Zukunft noch zuzunehmen drohen. Unter der Maßgabe, die deutschen und internationalen Klimaschutzziele bei gleichzeitiger Schonung der natürlichen Ressourcen zu erfüllen und die Belastung durch Luftschadstoffe und Lärm an den Flughafenstandorten auf umwelt- und gesundheitsverträgliche Werte zu reduzieren, ist ein radikales Umlenken in Richtung eines umweltschonenden Luftverkehrs erforderlich. Hierzu müssen Maßnahmen und Instrumente sowohl auf internationaler und europäischer als auch auf nationaler und lokaler Ebene umgesetzt werden.

Wie aber sieht ein umweltschonender Luftverkehr idealerweise aus? Welche Ziele müssen bis wann erreicht werden? Das UBA beschreibt im Folgenden seine Vision eines umweltschonenden Luftverkehrs und konkretisiert dabei die umwelt- und verkehrspolitischen Ziele, die mittelfristig (2030) und langfristig (2050) auf diesem Weg erreicht werden sollten. Die Vision ist Grundlage für eine Gesamtstrategie für einen umweltschonenden Luftverkehr. Im anschließenden Kapitel 5 werden dann die konkreten Maßnahmen und Instrumente abgeleitet, die notwendig sind, um die Vision Realität werden zu lassen.

Die Vision des UBA besteht aus acht zentralen Bausteinen. Nur das Zusammenwirken aller acht Bausteine stellt sicher, dass der Luftverkehr langfristig die Ziele des Umwelt- und Gesundheitsschutzes erfüllen kann. Das Herausgreifen einzelner Bausteine, beispielsweise zum Klimaschutz, ist nur bedingt zielführend, da andere Umweltprobleme und -ziele des Luftverkehrs nicht gelöst werden. Viele Bausteine bauen zudem aufeinander auf.

Baustein 1: Infrastruktur nachhaltig gestalten

Der Bund nutzt seine Steuerungsmöglichkeiten zur Planung und Ausrichtung einer umweltfreundlichen Luftverkehrsinfrastruktur in Deutschland **bis 2030**. Hierzu erstellt er auf der Grundlage einer auch an ökologischen Kriterien ausgerichteten Bedarfsplanung ein bundesweites Standortkonzept für Flughäfen. Die Erweiterungen von Flugplätzen dürfen nur im Einklang mit diesem übergeordneten Standortkonzept und unter Berücksichtigung umweltpolitischer Ziele erfolgen. Flugplätze, die dieser Planung des Bundes mit den dazugehörigen Bewertungsschritten nicht Stand halten oder eine übermäßige Umweltbelastung verursachen, werden bis 2050 zugunsten des Schutzes von Mensch und Umwelt geschlossen und renaturiert oder einer dem Standort angemessenen Nachnutzung zugeführt. Auf einen Neubau von Flugplätzen wird verzichtet.

Der Grundsatz der Nutzerfinanzierung ist bei der Weiterentwicklung der Luftverkehrsinfrastruktur handlungsleitend. Steuern und Gebühren tragen **bis 2050** neben der anteiligen Deckung der externen Kosten dazu bei, das Luftverkehrsaufkommen so zu lenken und die vorhandene Infrastruktur so zu nutzen, dass keine unvermeidbaren Umweltbelastungen in der Umgebung von Flugplätzen entstehen. Insbesondere die Entscheidung für Flugplatzstandorte mit Nachtflugbetrieb wird nach der Maßgabe getroffen, die Bevölkerung sowie Natur und Landschaft gar nicht oder möglichst wenig zu belasten.

Baustein 2: Kurzstreckenflüge auf die Schiene verlagern

Durch den gezielten Ausbau des Schienennetzes und Angebotsverbesserungen im Schienenverkehr („Deutschland-Takt“) einerseits, der Anlastung der externen Kosten bei allen Verkehrsträgern – auch des Luftverkehrs – andererseits, verdoppelt sich die Zahl der Bahnfahrpassagiere **bis 2030** gegenüber 2018. Auf denjenigen Verbindungen, wo die Bahn konkurrenzfähig zum Luftverkehr

ist, finden 2030 in Deutschland keine Kurzstreckenflüge mehr statt, da der Schienenverkehr hier das günstigere und umweltschonendere Angebot bei vergleichbarem Zeitaufwand bietet. Dies ist für den Großteil der Verbindungen zwischen den Ballungszentren und Flughäfen in Deutschland der Fall, da diese bis 2030 innerhalb von vier Stunden Reisezeit mit der Bahn erreichbar sind. Damit nimmt der innerdeutsche Kurzstrecken-Luftverkehr bereits bis 2030 deutlich ab und ist nur noch auf längeren Distanzen wirtschaftlich überhaupt rentabel (z. B. Hamburg – München). Durch die frei werdenden Flughafen-Slots werden Kapazitätsengpässe an Flughäfen beseitigt. Eine engere Anbindung der internationalen Verkehrsflughäfen in Deutschland bis 2030 an das Fernverkehrsnetz ermöglicht zudem die Verlagerung von Zubringerflügen auf die Schiene.

Bis 2050 ist die Schieneninfrastruktur in Deutschland so ausgebaut, dass die derzeitigen Verbindungen des gewerblichen Luftverkehrs zwischen nahezu allen deutschen Verkehrsflughäfen und Ballungszentren durch Bahnfahrten in weniger als vier Stunden ersetzt werden können. Die enge Verknüpfung von Schienen- und Luftverkehr macht Zubringerflüge oder die Flughafen-Anreise mit dem eigenen Auto zudem überflüssig: Der Check-in/Check-out mit Gepäckaufgabe/-abholung ist direkt von zu Hause aus möglich und das Bahnticket ist im Flugticket bereits integriert (durchgehendes Ticketing). Von der Anbindung der Flughäfen an das Schienennetz profitiert auch der Schienengüterverkehr: Bis zum Jahr 2050 ersetzen schnelle Güterzüge im Nachtsprung die nationalen Frachtflugverbindungen. Durch den Ausbau der Hochgeschwindigkeitstrassen können bis 2050 nahezu alle innerdeutsche Flüge des gewerblichen Passagier und Frachtverkehrs auf die Schiene verlagert werden. Weiterhin werden im grenzüberschreitenden Verkehr alle Flugverbindungen bis 2050 aus ökonomischen Gründen eingestellt, bei denen die Reiseorte mit der Bahn innerhalb von vier Stunden erreichbar sind.

Baustein 3: Klimarelevante Emissionen minimieren

Global nimmt **bis 2030** die Erkenntnis zu, dass der Luftverkehr deutlich stärker als bisher zum Klimaschutz beitragen muss, was Handlungsdruck erzeugt. Deutschland und Europa werden bis 2030 voranschreiten und Instrumente einführen, die die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs auf das Niveau von 2010 zurückführen. Gleichzeitig verständigt sich bis 2030 die internationale Staatengemeinschaft auf einen globalen und effizienten Klimaschutzmechanismus, der die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs aus fossilem Kerosin vollständig umfasst. Er ist anschlussfähig an die Klimaschutzmechanismen anderer Wirtschaftsbereiche (Energieerzeugung, Industrie, Landwirtschaft, Landverkehr,...) auf Basis eines CO₂-Preises und unter Berücksichtigung der externen Kosten des Luftverkehrs (siehe auch Baustein 5).

Gleichzeitig beginnt bis 2030 die praktische Umstellung auf nachhaltige, erneuerbare, synthetische Kraftstoffe (PtL – Power to Liquid). Es entstehen in einem ersten Schritt PtL-Demonstrationsanlagen, die synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom erzeugen und die großtechnische Herstellung einleiten. Sie stehen weltweit an für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien kostengünstigen Standorten. Durch erhebliche PtL-Anlageninvestitionen der führenden Volkswirtschaften wird nachhaltiges PtL bis 2030 im großtechnischen Maßstab zunehmend günstiger hergestellt. Einzelne Fluggesellschaften beginnen mit der großflächigen Einführung von PtL-Kerosin. Um die Markteinführung von nachhaltigen PtL bis 2030 weiter zu fördern, werden in einem zweiten Schritt in Ergänzung zu den preispolitischen Instrumenten ordnungspolitische Maßnahmen auf europäischer Ebene geschaffen (z. B. durch eine Beimischquote).

Der Luftverkehr trägt nicht nur mit CO₂-Emissionen, sondern auch mit Nicht-CO₂-Effekten zur Klimaveränderung bei. Diese sind selbst beim Einsatz von treibhausgasneutralen Treibstoffen, wie PtL, in klassischen Verbrennungstriebwerken nicht völlig vermeidbar. Die klimaverändernden Effekte aus Nicht-CO₂-Emissionen der Flugzeuge sind bis 2030 detaillierter erforscht und für Einzelflüge quantifizierbar, sodass zukünftig Flugrouten auf ihre Klimawirkung hin optimiert werden können. Die Integration der Nicht-CO₂-Effekte in einen effizienten, globalen Klimaschutz-

mechanismus beginnt, wird aber bei ausbleibendem Konsens zunächst in Vorreiterregionen – z. B. Europa – eingeführt. Bis 2050 umfasst dieser Klimaschutzmechanismus vollständig die Nicht-CO₂-Effekte des weltweiten Luftverkehrs. Ziel muss sein, die Nicht-CO₂-Effekte bis 2050 im Vergleich zu 2010 deutlich zu reduzieren.

Die Fortschritte in der landgebundenen Elektromobilität und gerade in der Entwicklung leistungsfähigerer Batterien sorgen dafür, dass die Bodenverkehre der Flughäfen bis 2030 voll elektrisch stattfinden. Durch effizienter werdende Flugzeuge und Flugverfahren sinken die CO₂-Emissionen bezogen auf die Personen- und Tonnenkilometer (Transportleistung). Der (PtL-)Kerosinverbrauch pro Personen- und Tonnenkilometer sinkt; die Effizienz der Flugzeuge steigt auf rund 2 % pro Jahr bis 2030.

Globale Klimaschutzmechanismen wirken. Die Treibhausgasemissionen der Luftfahrzeuge aus fossilem Kerosin werden bis 2050 auf null reduziert. Auch der global flächendeckende Einsatz von nachhaltigen PtL-Kraftstoffen trägt dazu bei. Luftfahrzeuge der Zukunft sind so effizient, dass sie **2050** rund 55 % weniger Treibstoffs pro Personen- und Tonnenkilometer im Vergleich zu 2010 verbrauchen. Über diesen Zeitraum werden etwa 2 % pro Jahr Effizienzsteigerung erreicht.

Kleine Luftfahrzeuge mit elektrischen Antrieben sowie mittelgroße Flugzeuge mit Hybridantrieben bedienen 2050 die verbliebenen innerdeutschen und grenzüberschreitenden Kurzstrecken im gewerblichen Luftverkehr, soweit sie nicht mit dem Schienenverkehr innerhalb von vier Stunden erreichbar sind (siehe Baustein 2). Mit elektrischen Flugzeugen wird somit erstmals die Vision vom klimaneutralen Fliegen realisierbar – allerdings nur auf kurzen Strecken.

Baustein 4: Lärm reduzieren – Bevölkerung schützen

Der Schutz vor störendem und gesundheitsschädlichem Lärm ist zentrales Element für eine gesundheits- und umweltverträgliche Gestaltung des Luftverkehrs im 21. Jahrhundert. Aus Sicht der Lärmwirkungsforschung sind Mittelungspegel von 45 dB(A) am Tag und 40 dB(A) in der Nacht anzustreben. Diese Immissionswerte sind mit verhältnismäßigen Mitteln bis 2050 jedoch nicht zu erreichen. Als dringlichstes Handlungsziel sind aber gravierende gesundheitliche Beeinträchtigungen zu vermeiden. Hierfür sind **bis 2030** an allen Flughäfen in Deutschland Lärmkontingente eingeführt, die den fluglärmbedingten Mittelungspegel in Wohngebieten tagsüber auf 63 dB(A) begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen, finden Kurzstreckenflüge in Deutschland nur noch in geringem Umfang statt (siehe Baustein 2). Start- und Landeentgelte werden verschärft und kleinere, hochbetroffene Orte gegebenenfalls umgesiedelt.

Weiterhin soll spätestens bis 2050 – idealerweise deutlich früher – an stadtnahen Flughäfen zwischen 22 und 6 Uhr kein regulärer Flugbetrieb mehr stattfinden. Damit werden nachts Mittelungspegel in städtischen Wohngebieten von 40 dB(A) nicht mehr überschritten. Unbedingt notwendiger Nachtflugbetrieb - dies betrifft fast ausschließlich Frachtflüge - wird in Deutschland an einem oder sehr wenigen Flughäfen in dünn besiedelter Umgebung abgewickelt. Durch intermodale Kooperationen wird Fracht von und zu diesen Flughäfen bundesweit schnell auf der Schiene transportiert. Bis 2030 werden für diese Flughäfen in dünn besiedelten Gebieten mit Nachtflugbetrieb die Planungen abgeschlossen, sodass umgehend mit dem Bau der land- und luftseitigen Infrastrukturen begonnen werden kann.

Bis 2050 werden zudem alle verfügbaren Lärminderungsmaßnahmen entschieden vorangetrieben und die Lärmkontingentierungsregelungen verschärft, um die Fluglärmbelastung am Tag in Wohngebieten auf einen Mittelungspegel von 58 dB(A) zu senken. Diese Ziele lassen sich an einigen wenigen deutschen siedlungsfernen Flughäfen durch strenge Emissionsauflagen und innovative Flugverfahren erreichen. An den stadtnahen Flughäfen ist dieses Lärmschutzziel jedoch nur mit einem eingeschränkten Flugbetrieb zu erreichen, sodass alle räumlich verlagerbaren Flüge stattdessen über siedlungsferne Flughäfen abgewickelt werden, die an ein leistungsfähiges Schienenverkehrsnetz angebunden sind.

Baustein 5: Externe Umweltkosten dem Verursacher anlasten

Die erheblichen volkswirtschaftlichen Kosten, die mit den zahlreichen vom weltweiten Luftverkehr verursachten Umweltproblemen einhergehen, werden verursachergerecht angelastet, d. h. es wird eine Internalisierung der externen Kosten vorgenommen. Die Klimafolgekosten werden in Europa **bis 2030** und weltweit **bis 2050** verursachergerecht vollständig angelastet. Auch die Kosten der gesundheitlichen Auswirkungen der lokalen Umweltbelastungen (v. a. Lärm und Luftschadstoffe) werden in Deutschland bis 2030 größtenteils und ab 2050 vollständig dem Verursacher angelastet. Gleichzeitig werden bestehende umweltschädliche Subventionen im Luftverkehr, insbesondere die Befreiung von der Energiesteuer, schrittweise bis 2030 abgebaut. Die Internalisierung externer Kosten führt zu mehr Kostenwahrheit, verringert die Luftverkehrs-Nachfrage und verbessert die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Verkehrsträger. Die erzielten Einnahmen durch die Internalisierung der externen Kosten und die Abschaffung umweltschädlicher Subventionen werden genutzt, um die Markteinführung innovativer Umwelt- und Klimaschutztechnologien im Luftverkehr zu fördern und auch Alternativen zum Fliegen, z.B. durch soziale Innovationen zu unterstützen.

Baustein 6: Für saubere Luft vor Ort sorgen

Der Luftverkehr beeinträchtigt insbesondere durch Start- und Landevorgänge, Bodenoperationen sowie durch Zubringerverkehr die Luftqualität in der Flugplatzumgebung. Vor allem Emissionen von Stickoxiden (NO_x) und Partikeln sind ein Gesundheitsrisiko für den Menschen und wirken sich negativ auf die Umwelt aus. **2030** liegen umfangreiche Erkenntnisse über die Emissionsquellen und kontinuierliche Daten über Ultrafeinstaubkonzentrationen im Umfeld von allen deutschen Flughäfen sowie fundierte Ansätze vor, wie sich diese Schadstoffemissionen reduzieren lassen. Konkrete Maßnahmen stellen sicher, dass die gesetzlichen Immissionsgrenzwerte in Deutschland auch bei dem prognostizierten wachsenden Verkehr unterschritten werden.

Durch konsequente Elektrifizierung des Vorfeldverkehrs sowie die Versorgung mit Bodenstrom und die Zuführung klimatisierter Frischluft über die Fluggastbrücke findet bis 2030 eine Verbrennung nur noch während der Start-, Flug- und Landephase des Flugzeugs statt (siehe Baustein 3). Der verbleibende spezifische Ausstoß von Stickoxiden je Start und Landung wird **bis 2050** um 90 % im Vergleich zu 2000 gemindert werden. Vergleichbare Reduktionen werden auch bei Partikelemissionen bzw. weiteren Vorläufersubstanzen der Partikelbildung erzielt.

Baustein 7: Ressourcen schonen, Rohstoffe effizient nutzen

Die Konstruktion von möglichst leichten Luftfahrzeugen und die hierfür verwendeten Werkstoffe sind **bis 2030** auch auf einen systematisch nachhaltigen Lebenszyklus der Luftfahrzeuge ausgerichtet. Ziel ist es, dass Luftfahrzeuge **bis 2050** zum größten Teil recycelbar entworfen und produziert werden und die eingesetzten Ressourcen bzw. deren Produkte nach Beendigung der Nutzungsphase dem Wirtschafts- und Stoffkreislauf wieder zugeführt werden. Die Herstellung erfolgt in einer Produktion, die energetisch vollständig durch erneuerbare Energien versorgt wird. Zur effizienten Ressourcennutzung gehört auch der sparsame und schonende Umgang mit Flächen und Böden bei Erweiterung und Umbau von Flughäfen einschließlich Maßnahmen zur Nachnutzung oder Renaturierung aufgegebenen Flugplatzflächen (siehe Baustein 1).

Baustein 8: Weniger fliegen

In dem Maß, wie der Luftverkehr bisher zur Vernetzung der Welt beiträgt und die Bedarfe wohlhabender Gesellschaften nach schnellem Reisen zu beliebigem Zweck und zügigem Warentransport bedient, hat er die Schwelle zur Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit überschritten. Auch mit weitreichenden technischen Innovationen (z. B. der Einführung von erneuerbarem PtL, siehe Baustein 3) werden sich bei anhaltendem Verkehrswachstum die negativen Auswirkungen nicht hinreichend reduzieren lassen. Oftmals ist das Gegenteil der Fall – ein ununterbrochenes Wachs-

tum der Flugbewegungszahlen kompensiert früher oder später die Einsparpotentiale bei Lärm- und CO₂-Emissionen neuerer Luftfahrzeuge.

Die zunehmenden Umwelt- und Gesundheitsprobleme, die vom Luftverkehr verursacht werden, führen **bis 2030** allmählich zu einem Umdenken. Unternehmen und Konsumierende sind weniger stark auf Leistungen des Luftverkehrs fixiert, nicht zuletzt aufgrund ökonomischer Anreize und regulatorischer Maßnahmen (siehe Bausteine 3 und 5) sowie Alternativen im Bahnverkehr (siehe Baustein 2). Steigende Ticketpreise, der vermehrte Ersatz von Geschäftsflügen durch leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur, das Kaufen regional angebauter oder produzierter Waren sowie eine höhere Akzeptanz längerer Transport- und Reisezeiten tragen dazu bei, das Luftverkehrsaufkommen **bis 2050** zu reduzieren.

Die Gesamtstrategie: Ein umweltschonender Luftverkehr 2050

Die Abbildung 18 illustriert die Bausteine der Vision des UBA für einen umweltschonenden Luftverkehr 2050. Werden die acht Bausteine Realität, wird der Luftverkehr im Jahr 2050 weitestgehend umwelt- und gesundheitsschonend sein. Der Luftverkehr wird mit leiseren, emissionsarmen und ressourcenschonenden Luftfahrzeugen durchgeführt. Diese sind treibhausgasneutral und leisten damit einen wichtigen Beitrag zur umweltschonenden Mobilität. Die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs werden minimiert. Das Luftverkehrsaufkommen entwickelt sich im Einklang mit seiner Umweltverträglichkeit.

Abbildung 18: Bausteine der Vision des Umweltbundesamtes für einen umweltschonenden Luftverkehr

Vision des Umweltbundesamtes für einen umweltschonenden Luftverkehr 2030 / 2050



Baustein 1 Infrastruktur nachhaltig gestalten

Der Bund steuert mit einer übergeordneten ökologisch-orientierten Bedarfsplanung die Entwicklung der Luftverkehrsinfrastruktur. Eine Nutzerfinanzierung ist eingeführt.



Baustein 2: Kurzstreckenflüge auf die Schiene verlagern

Durch den Ausbau der Schieneninfrastruktur einschließlich Hochgeschwindigkeitstrassen können nahezu sämtliche innerdeutsche Flüge des Fracht- und Passagierverkehrs auf die Schiene verlagert werden.



Baustein 3: Klimarelevante Emissionen minimieren

Die klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs, einschließlich der Nicht-CO₂-Effekte, werden in internationale Klimaschutzmechanismen basierend auf einer CO₂e-Bepreisung integriert. Erneuerbares nachhaltiges PtL wird bis 2050 als Kraftstoff weltweit eingeführt. Treibhausgasneutrales Fliegen ist 2050 Realität. Verbleibende Nicht-CO₂-Effekte werden kompensiert.



Baustein 4: Lärm reduzieren – Bevölkerung schützen

Bis 2050 werden an bedeutenden deutschen Flugplätzen Lärmkontingente eingeführt, welche die Fluglärmbelastung am Tag in Wohngebieten auf einen Mittelungspegel von 58 dB(A) begrenzen. An stadtnahen Flughäfen findet spätestens 2050 zwischen 22 und 6 Uhr kein regulärer Flugbetrieb mehr statt.



Baustein 5: Externe Umweltkosten dem Verursacher anlasten

Die Umwelt- und Gesundheitskosten des Luftverkehrs werden verursachergerecht angelastet (Internalisierung der externen Kosten). Umweltschädliche Steuervergünstigungen werden abgebaut.



Baustein 6: Für saubere Luft vor Ort sorgen

Die spezifischen Emissionen von Stickoxiden (NO_x), Partikeln und Vorläufersubstanzen werden bei Start- und Landevorgängen durch neue Triebwerkstechnologien bis 2050 um 90 % gegenüber 2000 gesenkt. Der Vorfeldverkehr wird durch Elektrifizierung emissionsfrei.



Baustein 7: Ressourcen schonen, Rohstoffe effizient nutzen

Die Herstellung von Luftfahrzeugen erfolgt bis 2050 vollständig recycelbar und mit erneuerbaren Energien. Durch sparsamen und schonenden Umgang mit Flächen und Böden bei der Entwicklung der Flughafeninfrastruktur sowie Maßnahmen zur Nachnutzung oder Renaturierung aufgegebener Flugplatzflächen wird die Flächennutzung minimiert.



Baustein 8: Weniger fliegen

Wo technische Innovationen und Maßnahmen nicht zu den erforderlichen Reduktionen der Klimawirkungen, Lärmimmissionen und Luftschadstoffemissionen führen, wird die Entwicklung des Luftverkehrsaufkommens mittels regulatorischer Instrumente und ökonomischer Anreize an seine Umweltverträglichkeit gekoppelt.

5 Instrumente und Maßnahmen für einen umweltschonenden Luftverkehr

Die in Kapitel 4 vorgestellte Vision des UBA für einen umweltschonenden Luftverkehr kann nur mit erheblichen Eingriffen erreicht werden. Im folgenden Kapitel werden die dafür erforderlichen Instrumente und Maßnahmen beschrieben. Hierbei werden alle Umweltbelastungen integriert betrachtet: vom Klimaschutz bis hin zum Lärmschutz, unter Berücksichtigung der lokal wirksamen Luftschadstoffe sowie anderer Umweltaspekte wie Flächeninanspruchnahme, Ressourcenverbrauch, Wasser- und Bodenschutz sowie den Auswirkungen auf die biologische Vielfalt.

Die erörterten Maßnahmen und Instrumente sind nach den Handlungsebenen aufgeteilt, auf denen diese ergriffen werden müssen: europäisch/international, national, lokal. Für globale Herausforderungen, wie den Klimaschutz, sind globale Lösungen besser geeignet als nationale oder europäische Alleingänge. Allerdings kann aufgrund des großen Handlungsdrucks in den meisten Fällen nicht auf diese Ideallösung gewartet werden. Stattdessen müssen – zumindest im ersten Schritt – nationale oder europäische Lösungen angestrebt werden. Dies betrifft die Kerosin- und Mehrwertbesteuerung sowie PtL-Einführung, die ausführlich in Kapitel 5.1 erläutert aber auch in Kapitel 5.2 thematisiert werden.

5.1 Instrumente und Maßnahmen auf europäischer und internationaler Handlungsebene

Die Instrumente und Maßnahmen auf europäischer und internationaler Handlungsebene sind in drei grundsätzliche Bereiche strukturiert. Instrumente können

- ▶ auf die technischen Zulassungsanforderungen für Luftfahrzeuge zielen (Abschnitt 5.1.1),
- ▶ ökonomische Anreize setzen (Abschnitt 5.1.2) und
- ▶ auf operationeller Ebene auf das konkrete Flugroutenmanagement einwirken (Abschnitt 5.1.4).

Mit Instrumenten aus allen drei Bereichen lassen sich die Lärm-, Luftschadstoff- und CO₂-Emissionen des Luftverkehrs mindern. Wie in Abschnitt 3.2.4 dargestellt, müssen auch die Nicht-CO₂-Effekte wirkungsvoll adressiert werden, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Dies kann ebenfalls mit technischen, ökonomischen und operationellen Instrumenten erfolgen. Angesichts der großen Bedeutung dieser Effekte sind diese Maßnahmen in Abschnitt 5.1.5 eigens zusammengefasst.

Alle diese Maßnahmen werden jedoch nicht ausreichen, um den Luftverkehr treibhausgasneutral zu gestalten. Dafür ist ein sogenannter „fuel switch“ hin zu nachhaltig erzeugtem PtL notwendig. Instrumente und Maßnahmen für eine schnelle PtL-Markteinführung, die gleichfalls auf technische, ökonomische und operationelle Aspekte zielen, werden im Abschnitt 5.1.3 behandelt.

5.1.1 Zulassungsanforderungen für Luftfahrzeuge

5.1.1.1 Minderung der Geräuschemissionen

Fluglärm entsteht hauptsächlich durch die Triebwerke und die Flugzeugzelle, sodass sich die Lärminderungsmaßnahmen an der Quelle hierauf konzentrieren. Eine Betrachtung der einzelnen Geräuschquellen am Flugzeug (Triebwerke, aerodynamische Geräusche durch Verwirbelungen an Vorflügeln, Landeklappen, Fahrwerk etc.) zeigt, dass beim Start der Lärmbeitrag der Triebwerke gegenüber dem Umströmungslärm dominiert. Bei der Landung kommt dagegen dem Umströmungslärm eine zunehmende Bedeutung zu, weil die Triebwerke mit wesentlich geringerer Leistung als beim Start betrieben werden und die aerodynamischen Geräusche, die durch das

Fahrwerk und die Landeklappen verursacht werden, in den Vordergrund treten. Generell ist der Lärmschutz an der Quelle allen anderen Maßnahmen zur Lärminderung vorzuziehen, da er effektiver ist.

Die zulässigen Geräuschemissionen von neuen Luftfahrzeugen sind international einheitlich im Anhang 16, Band I, zum Luftfahrtabkommen der ICAO geregelt (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2014). Neben den Lärmgrenzwerten für unterschiedliche zivile Flugzeuge und Hubschrauber enthält diese Vorschrift auch Bestimmungen für die Auswertung der Messergebnisse. Die Lärmpegel für einen bestimmten Luftfahrzeugtyp werden in der Regel als Effective Perceived Noise Level (EPNL) in der Einheit EPNdB angegeben. In Kapitel 4 dieses Regelwerks ist ein kumulativer Lärmgrenzwert festgelegt, der sich aus der Summe der Lärmpegel an drei genau definierten Lärmesspunkten ergibt. Der Wert hängt von der höchstzulässigen Startmasse (MTOM) des Luftfahrzeugs und der Triebwerksanzahl ab. Der Kapitel-4-Lärmgrenzwert gilt für Unterschall-Strahlflugzeuge und schwere Propellerflugzeuge, die zwischen 2006 und 2017 zugelassen wurden. Dieser Grenzwert wird jedoch von zahlreichen Flugzeugen deutlich unterschritten. Deshalb wurden auf ICAO-Ebene intensive Diskussionen über eine mögliche Verschärfung des Lärmgrenzwertes geführt. Diese haben zum Ergebnis geführt, dass der Kapitel-4-Lärmgrenzwert um 7 dB verschärft und im Kapitel 14 des Anhangs 16, Band I, festgelegt wurde. Dieser Wert gilt für neue Flugzeuge mit einer maximalen Startmasse ab 55 t, die seit dem 31.12.2017 zugelassen werden. Für leichtere Flugzeuge gilt der Kapitel-14-Grenzwert drei Jahre später.

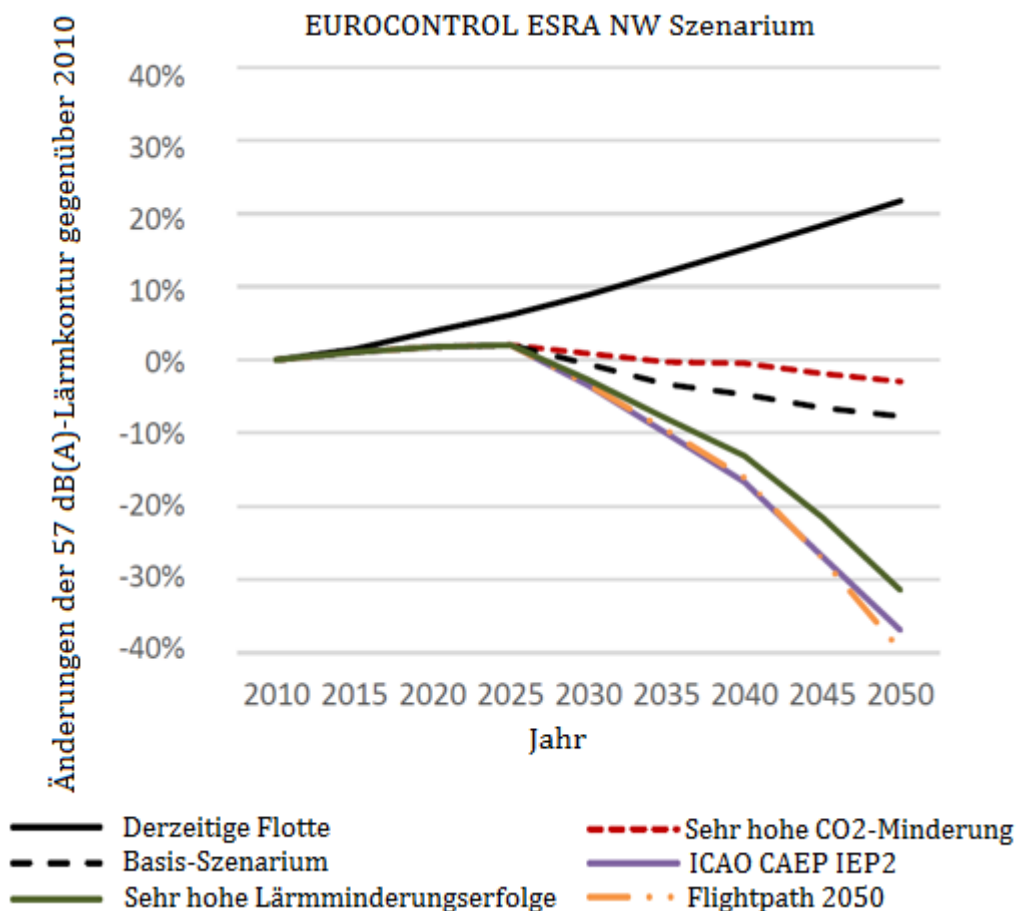
Abbildung 19 zeigt die Entwicklung der Geräuschemissionen anhand der kumulativen Unterschreitungen der verschiedenen Grenzwertstufen des ICAO-Anhangs 16, Band I. Angefangen von der ersten Grenzwertsetzung im Jahr 1971 (Kapitel 2) bis zu dem aktuellen Kapitel 14. Regionaljets werden in der Abbildung mit RJ abgekürzt, Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge mit SMR2, zweistrahlige Langstreckenflugzeuge mit LR2, vierstrahlige Langstreckenflugzeuge mit LR4 bezeichnet (European Aviation Safety Agency (EASA), 2017). Deutliche Unterschreitungen finden sich insbesondere seit 2006 mit der Einführung des Airbus A380 sowie der Boeing 787 (2011) und dem A350 (2014). Es ist zu erkennen, dass Luftfahrzeuge in der Vergangenheit kontinuierlich – wenn auch in abnehmendem Maße – leiser geworden sind. Neueste Verkehrsflugzeuge, wie die Boeing 787-800 oder der Airbus A350-900 unterschreiten bereits die erst seit 2018 gültigen verschärften ICAO-Lärmgrenzwerte.

Um auch bei einem weiter zunehmenden Luftverkehr die Fluglärmbelastung in Zukunft zu reduzieren, ist eine weitere Senkung der Lärmgrenzwerte auf internationaler Ebene erforderlich. Hierdurch sollen den Luftfahrzeug- und Triebwerksherstellern frühzeitig ambitionierte Zielwerte vorgegeben werden.

für die Geräuschimmissionen an Flughäfen. Basierend auf der EUROCONTROL Prognose ((European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), 2013) für die Region Nord-West-Europa (ESRA NW) wurde am Beispiel britischer Flughäfen untersucht, wie sich Fluglärmkonturen bei unterschiedlicher technologischer Entwicklung verändern. Im konkreten Fall wurde die Fläche der L_{Aeq} 57-dB-Konturen von britischen Flughäfen aus dem Jahr 2010 berechnet und deren Entwicklungen in verschiedenen Szenarien betrachtet. Bei weitreichenden technologischen Entwicklungen sind Reduktionen entsprechend dem Flightpath 2050 Szenario von bis zu -40 % möglich – ebenso aber auch ein Anwachsen der Fläche der Fluglärmkontur um 22 %, wenn weiterhin ausschließlich derzeit verkehrende Flugzeuge („only current types“) eingesetzt werden (Abbildung 20), (Torija et al., 2016).

Folgt man dem Basis-Szenarium, das der Entwicklung von ca. 0,1 dB pro Jahr und Zertifizierungspunkt entspricht (Entwicklungen innerhalb einer Flugzeuggeneration), ergibt sich ein relativ geringes Reduktionspotential hinsichtlich der Geräuschimmissionen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit neuer Technologien und wesentlich höherer Lärmzertifizierungsanforderungen.

Abbildung 20: Entwicklung der 57 dB(A)-Konturfläche bei wachsendem Luftverkehr und verschiedenen technologischen Entwicklungen



Quelle: (Torija et al., 2016)

5.1.1.2 Minderung der Schadstoff- und CO₂-Emissionen

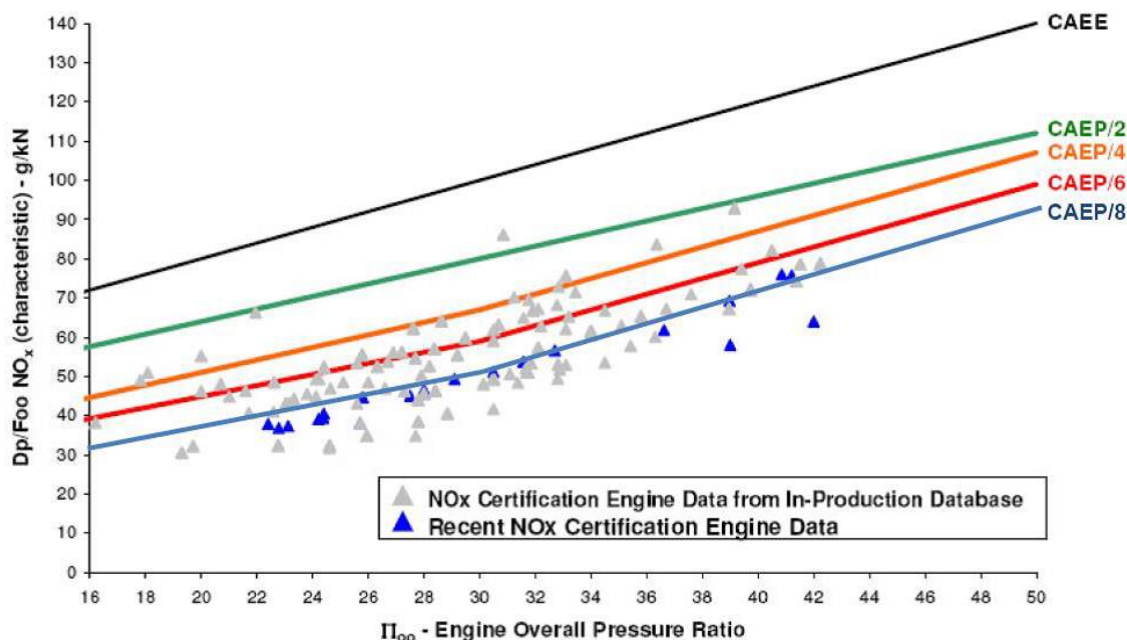
Die ICAO gibt internationale Grenzwerte zur Minderung der Schadstoff- und CO₂-Emissionen vor, die bei der Zertifizierung von neuen Triebwerkstypen einzuhalten sind. Sie ist damit ein wichtiger Treiber für die technische Weiterentwicklung von Triebwerken und Flugzeugen. Reglementiert

sind Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Ruß (Smoke Number) (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2008); (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2017b). Dabei ist Ruß nicht mit Feinstaub gleichzusetzen. Zudem wurde 2016 ein flugzeugbezogener CO₂-Standard beschlossen (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2018b). Im Folgenden wird die Grenzwertsetzung beispielhaft erläutert.

Stickoxide

Der Stickoxid-Grenzwert wird mit D_p/F_{oo} berechnet, wobei D_p die Masse der im Start/Landezyklus (LTO-Zyklus) emittierten Stickoxide und F_{oo} der maximale Schub des Triebwerks ist. Pro kN Schub darf das Triebwerk also eine bestimmte Menge NO_x emittieren. Darüber hinaus ist der Grenzwert vom Druckverhältnis des Triebwerks abhängig. Abbildung 21 zeigt die historische Entwicklung der Grenzwertkurven angefangen vom ersten Grenzwert (CAEE) bis hin zu CAEP 8.

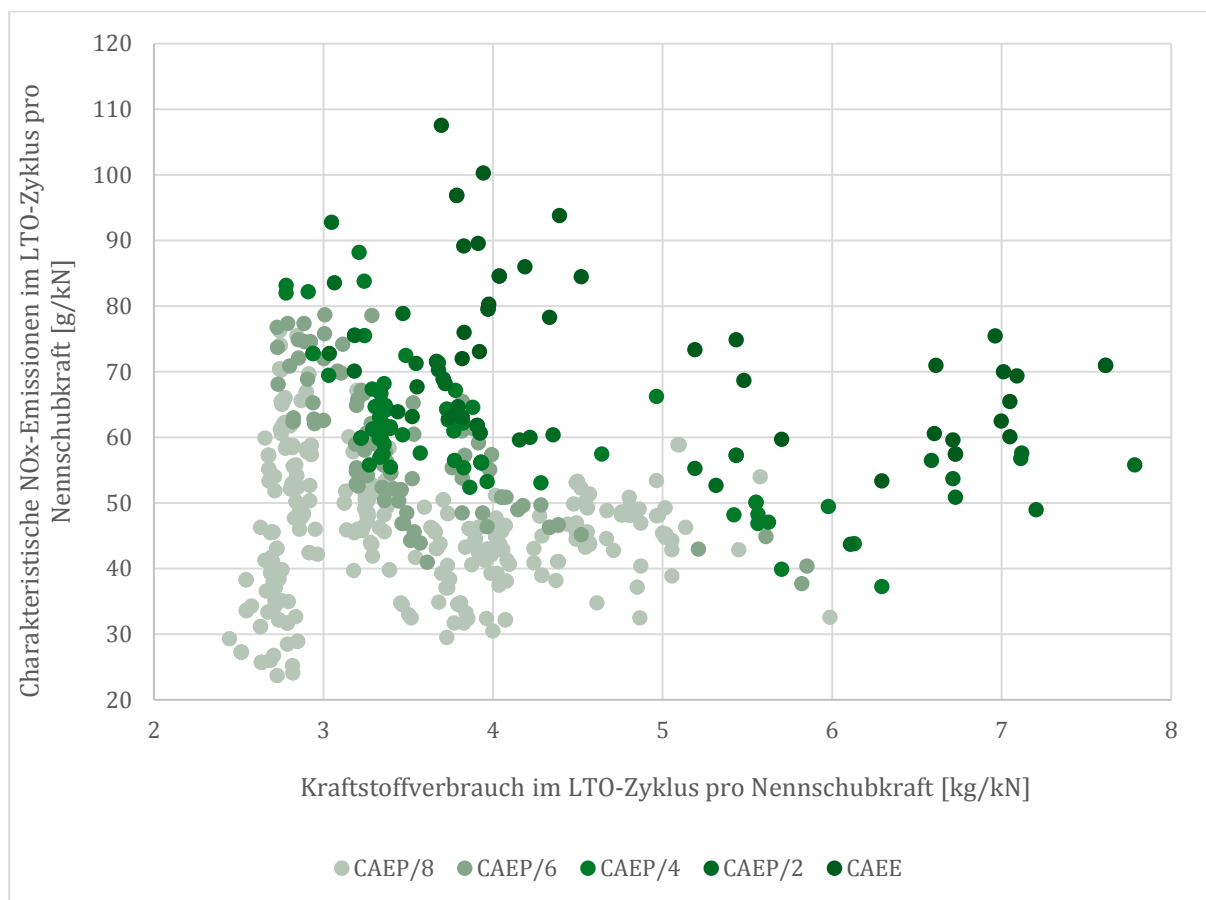
Abbildung 21: Entwicklung der NO_x-Grenzwertkurven



Quelle: (International Civil Aviation Organization, 2010)

Triebwerken mit höherem Druckverhältnis wird ein höherer spezifischer NO_x-Ausstoß zugestanden. Das liegt daran, dass höhere Drücke und Temperaturen in der Brennkammer des Triebwerks die Bildung von Stickoxiden begünstigen. Es wird damit argumentiert, dass dies den Kerosinverbrauch und damit den CO₂-Ausstoß senkt. Aus Umweltschutzsicht ist ein höherer NO_x-Ausstoß aber nur dann gerechtfertigt, wenn das Triebwerk tatsächlich weniger verbraucht. In Abbildung 22 wurde deshalb D_p/F_{oo} nicht über dem Druckverhältnis, sondern über dem Kraftstoffverbrauch pro Schub aufgetragen. Die Werte sind der ICAO Engine Emission Database entnommen.

Abbildung 22: NO_x-Ausstoß verschiedener Triebwerke



Quelle: eigene Darstellung nach (International Civil Aviation Organization, 2017)

Diese Abbildung zeigt, dass sich die Triebwerke, die unterschiedliche historische Grenzwerte einhalten, stark überlappen. Man findet Triebwerke, die den neuesten Grenzwert (CAEP 8) einhalten und trotzdem sowohl bezüglich des NO_x-Ausstoßes (D_p/F_{00}) als auch des Kraftstoffverbrauchs ($Fuel/F_{00}$) schlechter abschneiden als Triebwerke, die nur CAEP 6 erreichen. Für zukünftige Grenzwertsetzungen empfiehlt es sich daher, innerhalb der ICAO darauf hinzuwirken, dass nicht mehr das Druckverhältnis, sondern der Kraftstoffverbrauch als Korrelationsparameter genutzt wird. Eine fallende Grenzwertkurve würde dabei nicht nur den NO_x-Ausstoß, sondern auch den Kraftstoffverbrauch begrenzen.

Entsprechend der ACARE-Ziele sollte der Grenzwert so weiterentwickelt und verschärft werden, dass bis 2050 eine Reduktion des NO_x-Ausstoßes um 90 % und des Kraftstoffverbrauchs um 75 % im Vergleich zum Jahr 2000 erreicht wird (Henke et al., 2017).

Nichtflüchtige Partikel

Bisher wurden Partikel nur über die sogenannte Rußzahl reglementiert. Diese ergibt sich aus der Schwärzung eines Papierfilters, der in den Abgasstrahl eingebracht wird. Die Rußzahl wurde ursprünglich eingeführt um gute Sichtverhältnisse im Flugbetrieb sicherzustellen. Den heutigen Anforderungen an eine Feinstaubregulierung wird sie aber nicht gerecht. Die ICAO entwickelt daher derzeit einen Grenzwert für nichtflüchtige Partikel (nvPM), der sowohl die Masse als auch die Anzahl der Partikel berücksichtigen und 2019 von der ICAO beschlossen werden soll.

CO₂

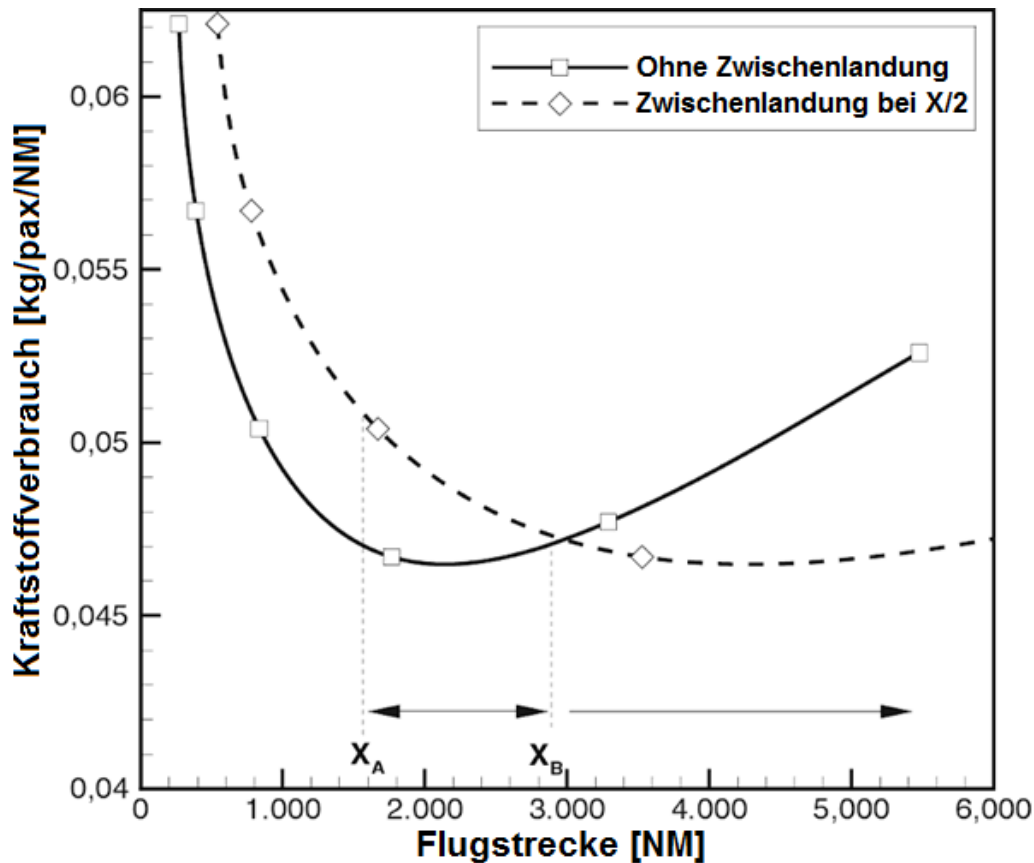
Der 2016 beschlossene CO₂-Standard der ICAO ist ein Zulassungsgrenzwert, der ab 2020 für neue Flugzeugtypen, ab 2023 für Änderungen von in Produktion befindlichen Flugzeugtypen und ab

2028 für neu gebaute Flugzeuge gilt. Für bereits gebaute und zugelassene Flugzeuge findet er keine Anwendung. Daher trägt er erst nach einer Durchdringung der Flugzeugflotte in den nächsten Jahrzehnten zur Absenkung der CO₂-Emissionen bei. Der Standard beruht im Wesentlichen auf der spezifischen Reichweite des Flugzeuges im Reiseflug (Specific Air Range, SAR) und ist darüber hinaus von der maximalen Startmasse (MTOM) abhängig. Zudem fließt die nutzbare Fläche im Flugzeug in den Grenzwert ein. Problematisch ist, dass der Grenzwert nicht zwischen Luftfahrzeugmasse und Ladung differenziert und somit kaum Anreize für Leichtbau setzt. Bezüglich Triebwerkseffizienz und Aerodynamik ist er hingegen gut geeignet, Verbesserungen zu erreichen, sofern er hinreichend ambitioniert ist. Die ICAO strebt im Luftverkehr jährliche Effizienzsteigerungen von 2 % an. Dies sollte sich in der regelmäßigen Fortschreibung des Grenzwertes für die Luftfahrzeugzulassung widerspiegeln - bis 2050 auf 45 % des Wertes im Vergleich zum Jahr 2010.

5.1.1.3 Begrenzung des Tankvolumens zur Vermeidung von Ultra-Langstreckenflügen

Starts und Landungen von Flugzeugen sind mit einem hohen Treibstoffverbrauch verbunden. Direktflüge sind daher häufig effizienter als Umsteigeflüge. Bei längeren Flugstrecken kann jedoch ein Zwischenstopp den spezifischen Verbrauch senken, da sich dann zu Beginn des Fluges weniger Kerosin an Bord befindet. Abbildung 23 zeigt, für eine Boeing 777-300, dass ab etwa 3.000 NM (5556 km) ein Tankstopp den Verbrauch senken kann. Der Stopp sollte einen möglichst geringen Umweg verursachen und möglichst in der Mitte der Gesamtstrecke liegen. Berücksichtigt man, dass die während Start und Landung entstehenden Emissionen im Verhältnis zum Kerosinverbrauch weniger klimaschädlich sind als im Reiseflug, dann könnte sich aus Klimaschutzsicht ein Zwischenstopp auch schon bei kürzeren Distanzen lohnen.

Abbildung 23: Kraftstoffverbrauch einer Boeing 777-300 je Passagier und nautischer Meile mit und ohne Zwischenstopp auf halber Flugstrecke



Quelle: (Filippone, 2012)

Extreme Langstreckenflüge wurden durch effiziente Flugzeuge überhaupt erst möglich. Sie bedeuten aber auch, dass ein Teil der Effizienzgewinne aufgrund längerer Distanzen vernichtet wird. Seit dem 25.03.2018 werden erstmals Direktflüge zwischen Australien und Europa im Linienflug angeboten. Die Verbrauchsdaten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Kerosinverbrauch einer Boeing 787-9 auf zwei Langstreckenflügen

Sitzplätze	Start	Ziel	Entfernung		Kerosinverbrauch		
			NM	Km	l	l/km	l/100km/Sitz
304	Seattle	Shanghai	4.972	9.208	64.749	7,03	2,31
236	Perth	London	7.828	14.498	110.000	7,59	3,21

Im Vergleich zur kürzeren Strecke Seattle-Shanghai fällt der Verbrauch des Flugzeuges pro km etwa 8 % höher aus. Hinzu kommt aber noch, dass aufgrund der großen Treibstoffmenge an Bord die Sitzanzahl verkleinert werden musste, sodass der Verbrauch pro 100 km und Sitz knapp 40 % höher ausfällt. Eine Begrenzung des Tankvolumens bei der Flugzeugkonstruktion und im Rahmen der Musterzulassung des Flugzeuges könnte hier Einhalt gebieten und extrem weite Direktflüge verhindern. Diese Begrenzung sollte in Abhängigkeit vom Treibstoffverbrauch des Flugzeuges erfolgen. Dies würde weitere Anreize für Effizienzverbesserungen schaffen.

5.1.1.4 Ziviler Überschall-Luftverkehr

Ab dem Jahr 2026 ist regelmäßiger ziviler Überschallverkehr zu erwarten. Der Umweltausschuss CAEP der ICAO erarbeitet daher derzeit Lärmschutzanforderungen an Überschallflugzeuge. Dabei wird angestrebt, dass die Flugzeuge beim Start und bei der Landung die derzeit für Unterschallflugzeuge geltenden aktuellen Lärmschutzanforderungen erfüllen, d. h. den Anforderungen nach ICAO-Anhang 16, Band I, Kapitel 14 (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2014) genügen. Aus Lärmschutzsicht hält das UBA es für dringend erforderlich, dass diese Überschallflugzeuge nicht hinter diese Anforderungen zurückfallen dürfen.

Eine Besonderheit beim Überschallflugverkehr liegt darin, dass nicht nur während der Start- und Landephase Fluglärmmissionen in relevanter Pegelhöhe verursacht werden, sondern auch beim Reiseflug. Dabei treten Überschallknalle auf, die auch bei großen Flughöhen am Boden noch hörbar sind. Zur Verringerung des Überschallknalls werden derzeit in den USA Flugzeuge entworfen, deren Überschallknalle nur noch wenig hörbar sein sollen. Auch flugbetriebliche Maßnahmen wie höhere Flughöhen, geringere Geschwindigkeit oder spezielle Steigprofile können dazu beitragen, den Überschallknall zu mindern. Hierzu hat die NASA ein Testflugzeug fertiggestellt, das nunmehr für Forschungszwecke eingesetzt wird. Im Rahmen dieser Untersuchungen sollen Testpersonen im Überschallverkehr in großer Höhe überflogen und die Belästigung durch Überschallknalle erfragt werden. Zudem wird auf ICAO-Ebene ein Lärmgrenzwert für den Reiseflug erarbeitet, um den Überschallknall während dieser Flugphase sachgerecht zu berücksichtigen. Da aber eine gesundheitliche Beeinträchtigung der Bevölkerung durch Überschallknalle nicht ausgeschlossen werden kann, plädiert das UBA für ein Verbot von Überschallflügen über Land. Es solches Verbot besteht seit langem in den USA.

Überschallflüge verursachen nicht nur Fluglärm, sondern wirken sich aufgrund der höheren Flughöhen auch negativ auf das Klima aus. Während Unterschallflugverkehr zumeist in der Troposphäre bzw. der Tropopause stattfindet, ist damit zu rechnen, dass Überschallflüge auch in der Stratosphäre erfolgen werden. Triebwerksemissionen in dieser Luftschicht, vor allem der Eintrag von Wasserdampf, sind besonders problematisch, weil sie das Klima deutlich mehr beeinflussen als in tieferen Luftschichten (Grewe et al., 2007), (Lee, 2018b). Darüber hinaus ist zu erwarten,

dass Überschallflugzeuge durch die stabilere Bauweise und höhere Fluggeschwindigkeit trotz der größeren Flughöhe einen höheren spezifischen Kerosinverbrauch und damit höhere CO₂-Emissionen haben werden.

Der bisherige CO₂-Standard gilt nur für Unterschallflugzeuge (Abschnitt 5.1.1.2.). Überschallflugzeuge sollten aus Sicht des UBA nur dann zugelassen werden, wenn diese die gleichen Anforderungen wie Unterschallflugzeuge erfüllen.

5.1.2 Ökonomische Anreize

Ökonomische Instrumente zielen darauf ab, dass Umweltbelastungen wie der klimaschädliche Ausstoß von Treibhausgasen bei den Verursachern Kosten verursachen, die in deren Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden. Jeder Verursacher kann dann jeweils selbst entscheiden, ob es für ihn günstiger ist, die umweltschädlichen Belastungen zu reduzieren oder für die Belastungen einen Preis zu bezahlen. Dies führt dazu, dass aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive die kostengünstigen Umweltschutzmaßnahmen zuerst ergriffen werden. Wenn so insgesamt ein ausreichender Umweltschutz erreicht wird, kann auf teurere Umweltschutzmaßnahmen verzichtet werden. Damit können ökonomische Instrumente bestimmte Umweltschutzziele zu geringeren volkswirtschaftlichen Kosten erreichen als andere, z. B. ordnungsrechtliche Instrumente.

Ihre Stärken haben ökonomische Instrumente dort, wo weniger die lokale Verteilung als vielmehr die Gesamtbelastung entscheidend ist, wie z. B. beim Klimaschutz. Denn dann können aus einer sehr großen Anzahl potenzieller Minderungsoptionen die günstigsten umgesetzt werden. Für die Begrenzung des Treibhausgaseffekts und der hierdurch hervorgerufenen Klimaänderung bis zur Mitte des Jahrhunderts ist die aggregierte Menge an Treibhausgasemissionen auf globaler Ebene entscheidend. Damit ist es theoretisch nicht von Belang, wo die erforderlichen Emissionsminderungen umgesetzt werden. Gleichwohl bestehen in der Realität politische, technische und wirtschaftliche Anforderungen, dass alle Staaten und Sektoren Emissionsminderungen durchführen, um die Klimaschutzziele des Übereinkommens von Paris zu erreichen.

Ökonomische Instrumente können prinzipiell in preis- oder mengenbasierte Instrumente unterschieden werden. Bei preisbasierten Instrumenten wie Steuern oder Abgaben legt der Staat den Preis für eine bestimmte Einheit Umweltbelastung, wie z. B. die Emission einer Tonne Kohlendioxid, fest. Die Verursacher entscheiden, wie stark sie das umweltschädigende Gut zu diesem Preis nutzen. Das Umweltschutzziel kann also über- oder untererfüllt werden, wenn eine zu hohe oder zu niedrige Steuer festgelegt wird.

Bei mengenbasierten Instrumenten wie dem Emissionshandel wird das politisch festgesetzte Umweltschutzziel, die Begrenzung von Emissionen, hingegen sicher erreicht. In diesem Fall legt der Staat die Obergrenze für das umweltschädigende Gut fest, indem er im Falle des Emissionshandels eine bestimmte Menge Emissionsberechtigungen ausgibt. Der Preis für die Emissionsberechtigung bildet sich auf dem Markt gemäß Angebot und Nachfrage.

Im Folgenden werden mit dem Europäischen Emissionshandel und der internationalen Klimaschutzmaßnahme CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) zuerst zwei existierende mengenbasierte Instrumente behandelt, bevor auf die preisbasierten Instrumente eingegangen wird.

5.1.2.1 Europäischer Emissionshandel (EU-ETS)

Der Europäische Emissionshandel (EU-ETS) ist das zentrale klimapolitische Instrument in Europa. Nach dem „Cap and Trade“-Prinzip sollen die Treibhausgasemissionen von Energie- und Industrieanlagen (seit 2005) sowie des innereuropäischen Luftverkehrs (seit 2012) möglichst kosteneffizient reduziert werden. Mit der staatlich festgelegten Obergrenze (Cap) wird politisch ent-

schieden, wie viel Treibhausgase von allen teilnehmenden Unternehmen gemeinsam höchstens ausgestoßen werden dürfen.

Die Mitgliedstaaten geben in Kooperation mit der EU-Kommission Emissionsberechtigungen an die teilnehmenden Unternehmen aus – teilweise kostenlos, teilweise werden sie versteigert. Jede Emissionsberechtigung erlaubt den Ausstoß einer Tonne CO₂-Äquivalent (CO_{2e}). Ein Unternehmen muss jährlich so viele Berechtigungen abgeben wie es CO_{2e} ausgestoßen hat. Andernfalls greifen Sanktionen in Höhe von ca. 100 Euro je Tonne zuzüglich zur weiterhin bestehenden Abgabepflichtung.

Über Auktionen und den Handel ergibt sich ein Marktpreis für Emissionsberechtigungen. Dieser ist niedrig, wenn im Verhältnis zur Nachfrage viele Emissionsberechtigungen zur Verfügung stehen. Werden diese bei einer anspruchsvollen Klimaschutzpolitik mit sinkenden Obergrenzen knapp, steigt der Preis. Wenn es kostengünstiger ist, eine Tonne CO_{2e} zu vermeiden als eine Emissionsberechtigung zu kaufen, lohnt es sich, technische oder auch organisatorische Minderungsmaßnahmen vorzunehmen. Das ist bei steigenden Preisen für immer mehr Unternehmen der Fall.

Für den Klimaschutz entscheidend ist, dass der Staat ein klimapolitisch anspruchsvolles Cap setzt und so dafür sorgt, dass CO₂ ein entsprechend knappes Gut ist. Nur dann bildet sich durch den Handel am Markt ein Preis für CO₂, der ausreichende Minderungsanreize setzt, in mehr Klimaschutz zu investieren oder auf klimaschonendere Brennstoffe zu wechseln.

Wie wichtig dies ist, zeigt die Erfahrung im Europäischen Emissionshandel der vergangenen zehn Jahre. Ausgelöst durch die Finanzkrise 2008 produzierten emissionsintensive Wirtschaftszweige weniger als ursprünglich angenommen und verursachten entsprechend weniger Emissionen. Die Nachfrage nach Emissionsberechtigungen sank. Das Angebot an Emissionsberechtigungen war hingegen weitgehend starr und verharrte durch politisch sehr großzügig gesetzte Verwendungsmöglichkeiten von Projektgutschriften und wenig ambitionierte Caps auf einem hohen Niveau. So kam es zu einem strukturellen Auseinanderdriften von Angebot und Nachfrage und der sukzessiven Anhäufung überschüssiger Emissionsberechtigungen. Dies sorgte für langanhaltend niedrige CO₂-Preise, die die Anreizwirkung des EU-ETS erheblich schwächten und damit die effiziente Erreichung der langfristigen Klimaschutzziele unterminierten. Erst mit den strukturellen Reformen vom Frühjahr 2018 (Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR), anteilige Löschung von Überschüssen) wurden wichtige erste Schritte zur Lösung dieses Problems beschlossen (Abbildung 24). Die MSR reduziert seit Anfang 2019 in Abhängigkeit von der Höhe der Marktüberschüsse Auktionsmengen in signifikantem Umfang und führt somit zu einem rascheren Abbau der Überschüsse.

Damit der Emissionshandel nicht unter seinen Möglichkeiten bleibt, ist die konsequente Ausrichtung auf ein ambitioniertes langfristiges Minderungsziel für 2050 (mindestens -95 %) und entsprechende Zwischenziele notwendig, die einen angemessenen Europäischen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele des Übereinkommens von Paris (1,5 °C-Ziel) ermöglichen³⁷. Außerdem ist es entscheidend, dass das Cap im EU-ETS stets auf die anderen energie- und klimapolitischen Maßnahmen und Instrumente abgestimmt ist, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der ETS-Emissionen haben.

³⁷ Vgl.: UBA-Stellungnahmen zur langfristigen europäischen Klimaschutzstrategie vom 8. Oktober 2018: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/strategy_for_long-term_eu_greenhouse_gas_emissions_reduction.pdf

Abbildung 24: Preisentwicklung von europäischen Emissionsberechtigungen (EUA) seit 2008



Quelle: Refinitiv Eikon (Stand: 15.11.2018)

5.1.2.2 Luftverkehr im EU-ETS

Daten und Fakten

Mit der Richtlinie 2008/101/EG wurde der Luftverkehr ab dem 1. Januar 2010 in den EU-ETS einbezogen. Aktuell werden dabei vom EU-ETS nur die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs erfasst. Während in den Jahren 2010 und 2011 zunächst die Überwachung und Berichterstattung der Emissionen implementiert wurde, besteht seit 2012 auch eine Abgabeverpflichtung und somit die vollständige Einbeziehung in den EU-ETS. Der grundsätzliche Anwendungsbereich beinhaltet alle Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraumes (EWR = EU und Norwegen, Island, Liechtenstein) sowie von und nach dem EWR und erfasst damit etwa ein Drittel der globalen CO₂-Emissionen des zivilen Luftverkehrs. Eine Verpflichtung zur Abgabe von Emissionsberechtigungen besteht derzeit jedoch nur für Emissionen von Flügen innerhalb des EWR.

Aktuell nehmen europaweit etwa 500 Luftfahrzeugbetreiber aus der ganzen Welt aktiv am EU-ETS teil, ca. 70 Betreiber werden von Deutschland verwaltet.

Tabelle 6: Ziele und Zielwerte des EU-ETS für den Luftverkehr

Ziele	Zielwerte
Reduktionsziele 2012 und 2013 bis 2020	-3 % (2012) und -5 % (ab 2013) im Vergleich zum Durchschnitt der Jahre 2004 bis 2006 (Basislinie), d. h. das Cap liegt bei 97 % bzw. 95%
Reduktionsziel der EU in absoluten Werten (bezogen auf den grundsätzlichen Anwendungsbereich)	Basiswert: 221,4 Mio. t CO ₂ Cap 2012: 214,8 Mio. t CO ₂ Cap 2013-2020: 210,4 Mio. t CO ₂

Ziele	Zielwerte
Aktive Teilnehmer am Emissionshandel im Luftverkehr	Europaweit mehr als 500 Luftfahrzeugbetreiber, für ca. 70 ist Deutschland zuständig
Kostenlose Zuteilung	85 % der Luftverkehrsberechtigungen 2012 82 % der Luftverkehrsberechtigungen ab 2013 nach europaweit einheitlichem Transportleistungs-Benchmark
Reserve	3 % der Luftverkehrsberechtigungen ab 2013
Versteigerungsquote	15 % der Luftverkehrsberechtigungen

Quelle: Umweltbundesamt

Zur Festlegung der Emissionsgrenze (Cap) im Luftverkehr wurden die durchschnittlichen Emissionen der Jahre 2004 bis 2006 für alle Flüge innerhalb des grundsätzlichen Anwendungsbereichs als Basiswert gewählt und das Cap wurde auf 97 % dieses Wertes für das Jahr 2012 und auf 95 % für die Jahre 2013 bis 2020 festgesetzt. Das sind entsprechend 214,8 Mio. t CO₂ für 2012 und 210,4 Mio. t CO₂ für die Jahre 2013 bis 2020. Bei seiner vollständigen Einbeziehung in 2012 war das Cap für den Luftverkehr daher bereits niedriger als die tatsächlichen Emissionen.

Zur Unterstützung der internationalen Bemühungen zur Einführung eines globalen Klimaschutzregimes wurde die Abgabeverpflichtung ab 2013 auf innereuropäische Flüge, den sogenannten reduzierten Anwendungsbereich, beschränkt und die Zuteilung von Emissionsberechtigungen wurde absolut entsprechend reduziert, ohne jedoch das prozentuale Reduktionsziel zu verändern. An die Stelle des ursprünglichen Caps trat damit ein de facto Cap von etwa 38 Mio. t CO₂.

Dem Luftverkehrssektor wird aus dem Cap eine begrenzte Anzahl Luftverkehrsberechtigungen (EU Aviation Allowances, EUAA) entsprechend europaweit festgelegter Zuteilungsregeln kostenlos zur Verfügung gestellt. Im Durchschnitt erhalten Luftfahrzeugbetreiber 82 % der Berechtigungen kostenlos, allerdings bezieht sich diese Zahl auf das Cap und nicht auf die aktuellen Emissionen. Die übrigen Ausgabemengen werden durch die Mitgliedstaaten versteigert (15 %) und über eine Sonderreserve an neue und besonders schnell wachsende Betreiber zugeteilt (3 %). Da der Luftverkehr, und somit auch seine Emissionen, stark wächst, deckt die kostenlose Zuteilung einen stetig sinkenden Anteil der Emissionen ab. Dieser Deckungsgrad ist außerdem mit mittlerweile 38 % deutlich geringer als der Anteil der kostenlosen Zuteilung an der Gesamtausgabemenge (Zahlen beziehen sich auf Deutschland; Tabelle 7). Ab dem 1. Januar 2021 wird auf diese Zuteilungsmenge zusätzlich in jedem Jahr ein linearer Kürzungsfaktor – wie im stationären Bereich des EU-ETS – angewandt. Der Kürzungsfaktor ist ein konstanter absoluter Wert, der 2,2 % der jährlichen Zuteilung jedes Betreibers im Zeitraum 2017 bis 2020 entspricht.

Tabelle 7: Übersicht über Zuteilungs- und Abgabemengen für den Luftverkehr

Jahr	Zuteilungsmenge [1000 EUAA]	Verifizierte Emissionen [kt CO ₂ -Äq]	Ausstattungsgrad
2013	5.160	8.610	59,9 %
2014	5.149	8.861	58,1 %
2015	5.101	8.929	57,1 %
2016	5.100	9.274	55,0 %

Jahr	Zuteilungsmenge [1000 EUAA]	Verifizierte Emissionen [kt CO ₂ -Äq]	Ausstattungsgrad
2017	5.098	9.105	56,0 %
2018	3.578	9.385	38,1 % ³⁸

Zeitraum: 2013 bis 2018 (reduzierter geografischer Anwendungsbereich, von Deutschland verwaltete Betreiber)

Quelle: Umweltbundesamt

Europaweit stehen der Ausgabemenge von ca. 38 Mio. Berechtigungen Emissionen von zuletzt (2017) 64,2 Mio. t CO₂ gegenüber. Es ist ersichtlich, dass die Höhe der Emissionen wesentlich höher als die dem Luftverkehr eigentlich zur Verfügung stehende Zuteilungsmenge ist. Dies ist nur aufgrund der uneingeschränkten Nutzungsmöglichkeit von Emissionsberechtigungen aus dem stationären Bereich (European Union Allowance – EUA – aus Anlagen der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie) möglich. Seit 2012 ist der Zukauf in sehr nennenswertem Umfang erfolgt: Luftfahrzeugbetreiber haben seit Einbeziehung des Luftverkehrs in das EU-ETS bereits 120 Millionen Emissionsberechtigungen aus dem stationären EU-ETS gekauft, um ihren Abgabepflichten nachkommen zu können. Dies ist Hauptgrund dafür, dass die Lenkungswirkung des EU-ETS auf das Wachstum von Verkehrsleistung und Treibhausgas-Emissionen des innereuropäischen Luftverkehrs bislang sehr eingeschränkt ist.

Verstärkt wurde dies durch die in den vergangenen Jahren sehr niedrigen Zertifikatspreise, die den starken Trend der wachsenden Nachfrage nach Flugreisen nicht wesentlich abschwächen konnten.

Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung

Die Überwachung und Ermittlung (Monitoring) der Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) sowie die jährliche Emissionsberichterstattung sind wichtige Bausteine des Emissionshandels. Die ermittelten CO₂-Emissionen eines Luftfahrzeugbetreibers für seine Flüge im abgelaufenen Kalenderjahr sind die Grundlage für die „Abrechnung“, d. h. die Abgabe der Emissionsberechtigungen für das betreffende Jahr.

Luftfahrzeugbetreiber sind verpflichtet, zunächst ein Konzept zur Überwachung und Ermittlung ihrer Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) zu erstellen. Dieses Monitoringkonzept ist sowohl inhaltlich als auch technisch die Grundlage für die jährliche Berichterstattung. Mit ihm werden die Anforderungen aus der Monitoring-Verordnung für den jeweiligen Luftfahrzeugbetreiber konkretisiert. Es muss beispielsweise dargestellt werden, wie der Treibstoffverbrauch für jeden einzelnen Flug erfasst und verarbeitet wird. Die Anforderungen an die Genauigkeit sind also sehr hoch.

Auf der Basis des Monitoringkonzepts sowie der Monitoring-Verordnung müssen jährlich die gesamten Emissionen ermittelt und Emissionsberichte erstellt werden. Diese müssen von einer unabhängigen Prüfstelle geprüft und dann jeweils zum 31. März des Folgejahres an das UBA übermittelt werden. Spätestens zum 30. April sind die Emissionsberechtigungen abzugeben. Die Erfüllung dieser Pflichten ist generell sehr hoch. Regelmäßig werden für mehr als 99 % der Emissionen rechtzeitig Emissionsberechtigungen abgegeben.

Die Prüfung der Monitoringkonzepte und der Emissionsberichte für den Luftverkehr sind in Deutschland dem Umweltressort und nicht, wie in anderen Staaten überwiegend üblich, dem Verkehrsressort zugeordnet. Zuständig ist das UBA. Konzepte, Berichte und Erfüllung der Abgabeverpflichtungen werden detailliert geprüft und auch bei den Luftfahrzeugbetreibern vor Ort nachvollzogen. Damit wird erreicht, dass die verursachten Emissionen vollständig erfasst werden und der EU-ETS eine sehr hohe Umweltintegrität aufweist. Luftfahrzeugbetreiber, die schuldhaft

³⁸ Die deutliche Änderung gegenüber dem Vorjahr ist auf die Insolvenz von Air Berlin zurückzuführen.

keine oder zu wenig Emissionsberechtigungen abgeben, werden zudem mit ca. 100 €³⁹ je nicht abgegebener Berechtigung sanktioniert.

Da das EU-ETS in 31 Staaten gilt (28 Staaten der Europäischen Union sowie Norwegen, Island und Liechtenstein), ist zur Einhaltung der angestrebten Umweltschutzziele sowie zur Vermeidung von Wettbewerbsverzerrungen eine einheitliche Umsetzung notwendig. Dafür stimmen sich die teilnehmenden europäischen Behörden regelmäßig ab. Es werden Erfahrungen ausgetauscht und gemeinsame Vollzugs-Leitlinien entwickelt.

Empfehlungen zur Weiterentwicklung des EU-ETS

Die Fortführung des EU-ETS für den Luftverkehr ist auch über 2020 hinaus notwendig. Wie im folgenden Kapitel 5.1.2.3 beschrieben, wird ab dem Jahr 2021 mit CORSIA zwar ein globales System eingeführt, jedoch ist dessen Ambitionsniveau – kohlenstoffneutrales Wachstum auf dem Niveau der Emissionen 2020 – nicht ausreichend, um auf das EU-ETS verzichten zu können, denn dieses legt deutlich strengere Abgabeverpflichtungen fest als CORSIA. Die bisher vom EU-ETS, aber nicht von CORSIA erfasste Emissionsmenge sollte auch weiterhin einem Klimaschutzinstrument unterliegen.

Darüber hinaus umfasst das europäische Klimaschutzziel im Rahmen des Übereinkommens von Paris auch die Emissionen aller innereuropäischen Flüge sowie aller von einem europäischen Flughafen startenden Flüge in Drittstaaten. Europa hat zugesagt, seine Emissionen bis 2030 um mindestens 40 % gegenüber 1990 zu mindern. Sollte der Luftverkehr diese Emissionsminderungen nicht erreichen, müssen andere Sektoren entsprechend höhere Minderungen erbringen. Der Emissionshandel bietet hier ein geeignetes flexibles Instrumentarium, das weiter genutzt werden sollte.

Ein reformierter Emissionshandel ist ein aussichtsreicher Weg, das Wachstum der europäischen Luftverkehrsemissionen künftig effektiv zu begrenzen. Damit kann der EU-ETS auch wichtige Impulse für die Verlagerung des innerdeutschen Luftverkehrs auf die Schiene setzen. Dies gilt umso mehr, als hier auch eine zusätzliche Flankierung um eine Kerosinsteuer und eine reformierte Ticketsteuer möglich sind. Eine entsprechende Flankierung ist zwar auch auf europäischer Ebene anzustreben, hat aufgrund des Einstimmigkeitsprinzips in der Steuergesetzgebung aber kurzfristig geringere Umsetzungschancen.

Ein wesentliches innovatives Element zur strukturellen Weiterentwicklung des EU-ETS ist eine zunehmend restriktivere Beschränkung der Nutzung von stationären Berechtigungen (EUA). Durch eine zunehmende Beschränkung der Nutzbarkeit von EUA über eine Quotierung würde das Luftverkehrs-Sektor-Cap stärker bindend. Damit würden das Emissions- und mittelbar auch das Verkehrsleistungswachstum eingeschränkt, bzw. sogar, je nach Ausgestaltung der Quotierung, auf einen Minderungspfad eingeschwenkt.

Künftig müssen aber auch die vom EU-ETS bisher nicht erfassten Nicht-CO₂-Effekte in die Abgabeverpflichtung einbezogen werden. Dies würde eine erweiterte Abgabeverpflichtung im Luftverkehr bedeuten und stellt neben der Nutzungsbeschränkung von EUA ein zweites Element zur strukturellen Weiterentwicklung des EU-ETS dar. Eine Einbeziehung der Nicht-CO₂-Effekte in eine marktbasierende Maßnahme bzw. anderweitige Regelungen werden in Zukunft unbedingt notwendig sein, um das Klimaschutzziel des Übereinkommens von Paris zu erreichen (siehe auch Abschnitt 3.2.3 und 3.2.4). Neben einer zu geringen Lenkungswirkung besteht bei einem alleinigen Abzielen auf CO₂-Emissionen sogar die Gefahr einer verfehlten Anreizwirkung: So können z. B. Maßnahmen für eine klimaoptimierte Flugroutenführung einen höheren Treibstoffverbrauch und

³⁹ Die Höhe der Sanktion ändert sich jährlich wie folgt: Basiswert = 100 € in 2012, jährliche Anpassung entsprechend der Änderung des Verbraucherpreisindexes.

damit höhere CO₂-Emissionen nach sich ziehen, obwohl sie unter Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte in Summe eine geringere Klimawirkung aufweisen. Dies hat die EU-Kommission erkannt. In der Verordnung (EU) Nr. 2017/2392⁴⁰ wird in Erwägungsgrund 13 erläutert, dass die Kommission trotz der technischen und politischen Schwierigkeiten in diesem Bereich (Nicht-CO₂-Effekte) ihre Arbeiten beschleunigen und soweit wie möglich alle Auswirkungen des Luftverkehrs berücksichtigen sollte. Das UBA bereitet durch entsprechende Forschung, u. a. im Forschungsvorhaben „Möglichkeiten der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten im Luftverkehr am Beispiel des EU-ETS und von CORSIA“ Vorschläge vor, wie diese Effekte analog zum CO₂ in marktbasierende Maßnahmen wie den Emissionshandel eingebunden werden können. Siehe hierzu auch Abschnitt 5.1.5.

Darüber hinaus ist auch im Luftverkehr die konsequente Ausrichtung auf eine gesamtwirtschaftliche Treibhausgasneutralität bis 2050 und entsprechende Zwischenziele notwendig (siehe Baustein 3). Der ab dem 1. Januar 2021 angewandte lineare Kürzungsfaktor von 2,2 % ist zwar ein Fortschritt gegenüber dem konstant verlaufenden Cap, reicht dazu aber nicht aus.

Und schließlich ist es sinnvoll, den Auktionsanteil von derzeit 15 % des Caps deutlich zu erhöhen, um den Anteil an kostenloser Zuteilung, die letztlich eine Subvention darstellt, zu verringern. Dies würde das Polluter-pays-Prinzip stärker zur Anwendung bringen und Einnahmen generieren, die zumindest in Deutschland in den nationalen Innovations- und Demonstrationsfonds Luftverkehr (Abschnitt 5.2.2.2) fließen sollten.

Bei der für 2020 auf Ebene der EU anstehenden Reform der Regelungen zum Luftverkehr im Emissionshandel, spätestens jedoch bis 2030, sollen nach Auffassung des UBA deshalb die folgenden wesentlichen Punkte in der Emissionshandelsrichtlinie umgesetzt werden:

- ▶ Beschränkung der Nutzbarkeit von EUA in Form einer stetig strikter werdenden Quotierung, die das derzeitige Emissionswachstum zunehmend einschränkt und auf einen Minderungspfad einschwenken lässt
- ▶ Erweiterte Abgabeverpflichtung zur Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte
- ▶ Cap-Absenkung hin zu einem Paris-kompatiblen Pfad (Forderung gilt analog im stationären Sektor)
- ▶ Erhöhung des Auktions-Anteils

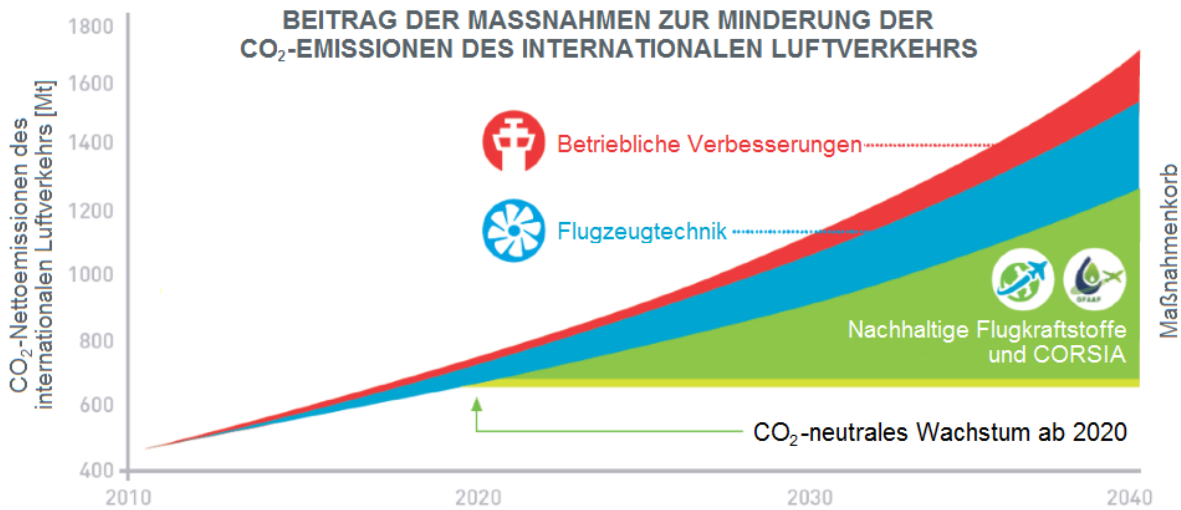
5.1.2.3 CORSIA als marktbasierende Klimaschutzmaßnahme der ICAO

Die ICAO strebt als sogenanntes „aspirational goal“ ein CO₂-neutrales Wachstum des internationalen Luftverkehrs ab dem Jahr 2020 an (ICAO-Resolution A37-19). Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein sogenannter „basket of measures“, also ein Maßnahmenkorb entwickelt, der drei grundsätzliche Bereiche umfasst (Abbildung 25). Erstens sollen durch technische und betriebliche Effizienzsteigerungen Emissionsminderungen erreicht werden. So sollen technische Verbesserungen, z. B. bei der Aerodynamik oder an Triebwerken, eine jährliche Effizienzsteigerung von 2 % beim Treibstoffverbrauch sicherstellen. Zu den betrieblichen Verbesserungen gehören die Optimierung von Flugrouten oder die Entwicklung treibstoffsparender An- und Abflugverfahren. Zweitens sollen nachhaltige alternative Treibstoffe dazu beitragen, dieses Ziel zu erreichen. Da die technischen und betrieblichen Verbesserungen die Emissionen aus dem Wachstum des Luftverkehrs jedoch nicht ausgleichen können und nachhaltige alternative Treibstoffe kurzfristig nicht in

⁴⁰ Verordnung (EU) 2017/2392 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2017 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zur Aufrechterhaltung der derzeitigen Einschränkung ihrer Anwendung auf Luftverkehrstätigkeiten und zur Vorbereitung der Umsetzung eines globalen marktbasierten Mechanismus ab 2021.

bedeutendem Umfang zur Verfügung stehen, soll das Emissionswachstum zunächst an anderer Stelle kompensiert werden.

Abbildung 25: Elemente des „Basket of Measures“ und deren Beitrag zum Carbon Neutral Growth



Quelle: Eigene Darstellung nach (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2018a)

Kompensation von CO₂-Emissionen

Am 6. Oktober 2016 hat die ICAO nach sechs Jahren intensiver Verhandlungen eine globale, marktbasierende Maßnahme zur Kompensation der CO₂-Wachstumsemissionen des internationalen Luftverkehrs beschlossen. CORSIA sieht eine Kompensation durch Projektgutschriften (Offsets) und Emissionsberechtigungen aus Emissionshandelssystemen vor. Das bedeutet, dass alle zukünftigen Emissionen oberhalb der Basisemissionen, also der Höhe der durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Jahre 2019 und 2020, an anderer Stelle zusätzlich eingespart werden müssen. Hierzu müssen Fluggesellschaften den Erwerb und die Löschung von Emissionsminderungsgutschriften und Emissionsberechtigungen nachweisen. Während anfangs für alle Fluggesellschaften das Wachstum des gesamten internationalen Luftverkehrs für die Berechnung ihrer Kompensationsverpflichtungen angewendet wird (sektoraler Ansatz), wird später dazu übergegangen, das individuelle Emissionswachstum immer stärker zu gewichten. Stärker wachsende Fluggesellschaften müssen dann einen höheren Anteil ihrer Emissionen kompensieren als andere.

Die Umweltintegrität von CORSIA als Instrument zur CO₂-Stabilisierung hängt wesentlich davon ab, wie zuverlässig Emissionen an anderer Stelle gemindert werden können und dass eine mehrfache Anrechnung der Minderungsleistung (Doppelzählung) ausgeschlossen ist. Um dies zu bewerten, wurden von der ICAO insgesamt 19 Qualitätskriterien erarbeitet und beschlossen, die die Programme und die von ihnen ausgegebenen Emissionsminderungsgutschriften einhalten müssen. Auf Programmebene wurden 11 Program Design Elements definiert: Hierunter fallen z.B. Kriterien zur Methodenklarheit, Transparenz, Nachverfolgbarkeit oder die Vermeidung von Doppelzählung. Die Gutschriften selbst werden anhand von 8 Carbon Offset Credit Integrity Assessment Criteria auf ihre Qualität bzw. Umweltintegrität geprüft. Dies beinhaltet u.a. die Bewertung zur Zusätzlichkeit der Minderungsgutschriften, zur Nutzung einer realistischen Baseline, zur Projektverifizierung durch unabhängige Dritte oder zur Sicherstellung dauerhafter Emissionsreduktionen. Die Kriterien sind auf der ICAO Webseite⁴¹ zu finden. Eine technische Arbeitsgruppe, das Technical Advisory Body (TAB), ist für die technische Überprüfung der Qualität der Programme

⁴¹ <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Emissions-Units.aspx>.

und deren Minderungsgutschriften zuständig. Das TAB erarbeitet Empfehlungen für die unter CORSIA zur Erfüllung der Kompensationsverpflichtungen nutzbaren Minderungsgutschriften. Diese Empfehlung soll im Frühjahr 2020 dem ICAO Rat vorgelegt werden.

Anwendungsbereich und Zeithorizont

Grundsätzlich sind von CORSIA alle zivilen internationalen Flüge erfasst. Diese verursachen etwa zwei Drittel der Gesamtemissionen des weltweiten zivilen Luftverkehrs. Nicht für alle Flüge bzw. Routen besteht jedoch auch eine Kompensationsverpflichtung. So sind z. B. Flüge von oder nach wenig entwickelten Ländern dauerhaft ausgenommen, sofern sich diese Staaten nicht für eine freiwillige Teilnahme entscheiden.

Die folgende Tabelle stellt die unterschiedlichen Anwendungsbereiche des EU-ETS und CORSIA dar.

Tabelle 8: Geltungsbereich von EU-ETS und CORSIA für verschiedene Kategorien von Flügen

Kategorie	Erfasst von
EWR national	EU-ETS
Nicht-EWR national	-
EWR – Nicht-EWR	CORSIA
Nicht-EWR – Nicht-EWR	CORSIA
EWR –EWR	EU-ETS und CORSIA

Quelle: Umweltbundesamt

Es ist geplant, CORSIA in mehreren Phasen einzuführen: Nach einer zweijährigen Periode 2019 bis 2020 zur Bestimmung der Baseline-Emissionen sind zwei dreijährige Phasen – Pilot Phase (2021 bis 2023) und Phase 1 (2024 bis 2026) – vorgesehen, bei denen Staaten freiwillig über ihre Teilnahme entscheiden können, bevor verbindliche Kriterien für die verpflichtende Teilnahme in der dritten Phase (2027 bis 2035) greifen. Momentan haben bereits 81 Staaten eine freiwillige Teilnahme zwischen 2021 und 2026 zugesagt. Diese Staaten repräsentieren 76,6 Prozent der globalen, internationalen Luftverkehrsleistung (Stand 16.07.2019). Dazu gehören alle europäischen Staaten und somit auch Deutschland.

Überwachung und Berichterstattung

Maßgeblich für das klimaschützende und wettbewerbsneutrale Funktionieren des Systems sind, wie im EU-ETS, die Überwachung und Berichterstattung der verursachten Emissionen. Das maßgebliche Regelwerk der ICAO, die „Standards and Recommended Practices (SARPs)“, wurden unter intensiver Mitarbeit des UBA entwickelt. Dabei wurden Erfahrungen eingebracht, die bereits im EU-ETS und in der Arbeit mit anderen marktbasieren Klimaschutzinstrumenten gesammelt wurden. Die SARPs legen unter anderem administrative Erfordernisse, Überwachungs-, Berichterstattungs- und Verifizierungsregeln (MRV-Regeln), die Berechnung der Höhe der Kompensationsverpflichtungen sowie die Kriterien zur Nutzung von Minderungseinheiten fest. Sie wurden am 27. Juni 2018 vom ICAO-Rat beschlossen und gelten seit dem 1. Januar 2019.

Anrechenbare alternative Kraftstoffe

Die Kompensationsverpflichtung der Fluggesellschaften kann durch den Einsatz so genannter anrechenbarer Kraftstoffe reduziert werden. Als anrechenbare Flugkraftstoffe⁴² sieht das CORSIA-

⁴² Die offizielle Bezeichnung ist „eligible fuels“.

Regelwerk nachhaltig hergestellte alternative Flugkraftstoffe (Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe wie Power to Liquid (PtL; Abschnitt 5.1.3)) vor. Auf Drängen einiger Mitgliedstaaten der ICAO sind 2017 zudem „bessere“ konventionelle Kraftstoffe, die auf Basis einer Lebenszyklusanalyse (LCA) mindestens 10 % weniger Treibhausgas emittieren als fossile Referenzkraftstoffe mit durchschnittlich 89 gCO₂/MJ anrechenbar. Der Einsatz solcher Kraftstoffe bewirkt keine Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Verbrennung. Hier werden lediglich die geringeren Treibhausgasemissionen bei der Kraftstoffherstellung, d. h. aus der Vorkette, berücksichtigt. Diese verminderten Emissionen können sich die verpflichteten Fluggesellschaften in CORSIA anrechnen lassen.

Bezüglich alternativer Kraftstoffe sind die Diskussionen der ICAO stark auf Biokraftstoffe fokussiert. Dem liegt im Wesentlichen der erfolgreiche Einsatz von Beimischungen aus biogenen und fossilen Kraftstoffen zu Demonstrationszwecken zugrunde, der zum Anlass sehr optimistischer Projektionen möglicher Einsatzmengen genommen wird. Das Treibhausgasreduzierungspotential alternativer Kraftstoffe fällt für Kraftstoffe auf Basis von Rest- und Abfallstoffen am höchsten aus, Kraftstoffe auf Basis von Anbaubiomasse erreichen aber nur selten wenigstens 50 % Reduktion gegenüber der fossilen Referenz⁴³. Große Datenunsicherheiten in der Lebenswegbetrachtung sowie die ökologischen und sozioökonomischen Risiken massiver Landnutzungsänderungen sind bei den Schätzungen und Berechnungen weitgehend außer Acht gelassen.

Die Nachhaltigkeitskriterien in CORSIA sind sehr schwach. So besteht kein prinzipielles Verbot des Anbaus von Biomasse auf frisch umgebrochenen Flächen, solange die LCA eine Treibhausgas-Einsparung von mindestens 10 % gegenüber der fossilen Referenz aufweist. Andere Nachhaltigkeitskriterien, die im Rahmen der Biomassenutzung entwickelt wurden und die den Qualitätserhalt von Wasser, Boden und Luft, die Arbeits- und Landnutzungsrechte und Lebensmittelsicherheit adressieren, sind in CORSIA bisher nicht enthalten.

Für jeden Herstellungspfad müssen die Treibhausgasemissionen nach LCA bilanziert werden, um die Einsparung gegenüber der fossilen Referenz zu quantifizieren. Bisher (Stand Oktober 2018) wurden ca. 30 Herstellungspfade für Biokraftstoffe bilanziert⁴⁴. Nur bei ihnen handelt es sich derzeit um anrechenbare Kraftstoffe. Die Bilanzierungen sollen sukzessive auf weitere Pfade ausgedehnt werden, sobald sich ein praktischer Einsatz neuer Pfade abzeichnet. PtL als Ganzes ist deshalb auch für die nächste Zeit nicht vorgesehen. Auch zum Nachweis der Einsparungen von „besseren“ konventionellen Kraftstoffen existieren bisher weder Methoden noch nennenswerte regulative Ansätze; sie sind derzeit noch nicht anrechenbar.

Das Kostenargument scheint den Einsatz alternativer Kraftstoffe nicht naheulegen. Die Treibhausgas-Minderungskosten bei Biokraftstoffen sind im Vergleich zu Offsets derzeit (Stand Juni 2018) um den Faktor 6 bis 10 höher. Gleichwohl können nationale Förderungen in Anbauländern und anderswo die Kostendifferenz mindern. Zudem kann die Nutzung alternativer Kraftstoffe, also auch solchen aus Biomasse, als ein Werbeargument von Fluggesellschaften gegenüber ihren Kunden dienen und eine gewisse Preisdifferenz rechtfertigen. PtL-Kerosin steht in dieser Hinsicht vor ähnlichen ökonomischen Herausforderungen. Um zu verhindern, dass Anbaubiomasse mittelfristig im Luftverkehr genutzt wird, ist es notwendig, Pilot- und Demonstrationsvorhaben zu fördern, um eine Markteinführung der PtL-Technik zu ermöglichen (Abschnitt 5.1.3) und die langfristige Verfügbarkeit der Technik zur treibhausgasneutralen Gesamtversorgung des Luftverkehrs zu gewährleisten (Purr et al., 2016).

⁴³ Die hohe Flächenintensität der ineffizienten Energiespeicherung mittels Photosynthese, die damit verbundenen massiven Transaktionskosten und entsprechende Emissionen sind die Hauptgründe für dieses begrenzte Treibhausgas-Minderungspotenzial von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse bei sehr hohem Preis.

⁴⁴ Inklusiv regionaler Varianten.

Fazit und Ausblick zu CORSIA

CORSIA wurde nach mehr als sechs Jahren intensiver Verhandlungen auf internationaler Ebene beschlossen und stellt einen zäh erkämpften Kompromiss zwischen klimapolitisch fortschrittlichen und eher wachstumsorientierten Staaten dar. Aus Sicht des UBA ist CORSIA – insbesondere aufgrund seines globalen Charakters – eine große Chance für mehr Klimaschutz im internationalen Luftverkehr, wenn die Regelung weiterentwickelt wird. In seiner jetzigen Ausgestaltung ist CORSIA nur ein erster Schritt und nicht ausreichend für die Erreichung des Paris-Ziels. Emissionen in der Höhe von ca. 700 Mio. t jährlich – die voraussichtliche Höhe der Baseline – werden nicht kompensiert. Die Emissionsminderungen im Luftverkehrssektor selbst werden angesichts der potenziell großen Verfügbarkeit von günstigen Gutschriften absehbar sehr gering ausfallen. Darüber hinaus findet bisher keine Einbeziehung der Nicht-CO₂-Effekte mit einer entsprechenden Kompensation statt.

Eine u. a. auch vom Luftverkehrsverband IATA (International Air Transport Association) als Ziel formulierte Weiterentwicklung von CORSIA, welche die nicht durch Offsets kompensierten Emissionen ab 2035 stark senken und im Jahr 2050 auf die Hälfte der CO₂-Emissionen des Jahres 2005 reduzieren könnte, würde zu nicht kompensierten CO₂-Emissionen von jährlich immer noch 200 Mio. t führen. Wie der jüngste Bericht des IPCC zur Erwärmung um 1,5 °C gezeigt hat, müssen die globalen CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2030 aber um ca. 45 % gegenüber 2010 reduziert und um das Jahr 2050 auf netto Null reduziert werden (Allen et al., 2018).

Die Umweltintegrität von CORSIA hängt wesentlich davon ab, wie zuverlässig Emissionen an anderer Stelle tatsächlich gemindert werden. Hier ist die ICAO in besonderer Pflicht, nur vertrauenswürdige Programme und Projekte zuzulassen und die Emissionsminderung auch konsequent zu überprüfen.

Hinsichtlich der alternativen Kraftstoffe bewertet das UBA die Fokussierung auf Biokraftstoffe als kritisch. Mit Ausnahme der Nutzung eines kleinen Anteils zusätzlich anfallender biogener Rest- und Abfallstoffe sieht das UBA in der Nutzung von Biokraftstoffen keinen zielführenden oder gar nachhaltigen Weg zur Erreichung ambitionierter Minderungsziele im Luftverkehr.

Die Möglichkeit zur Anrechnung von Minderungsleistungen bei konventionellen Kraftstoffen betrachtet das UBA als Risiko, denn sie zementiert bestehende Bereitstellungsketten (Lock-in-Effekte). Sie kann fossile Bereitstellungsketten nur graduell verbessern und könnte so den Übergang auf die Langfristlösung PtL verzögern oder blockieren.

Durch die von der ICAO festgeschriebenen Überprüfungen im 3-Jahres-Rhythmus bestehen hinsichtlich der Weiterentwicklung und Ambitionssteigerung von CORSIA gute Chancen, insbesondere bei stärker werdendem Bewusstsein und Druck der Öffentlichkeit, sowohl Paris-kompatible Minderungspfade einschließlich des Einbezugs von Nicht-CO₂-Effekten als auch anspruchsvolle Emissionseinheiten zur Erfüllung der Kompensationspflicht und Nachhaltigkeitskriterien für alternative Treibstoffe durchzusetzen. Hierzu ist es notwendig, CORSIA in Europa vollständig und in Ergänzung zum EU-ETS umzusetzen, um dadurch das Mandat und die Überzeugungskraft zu gewinnen, im Rahmen der ICAO an der Weiterentwicklung des Instruments intensiv mitwirken zu können. Denn mit eigenen Instrumenten kann Europa nur einen kleinen Teil des internationalen Luftverkehrs wirkungsvoll beeinflussen.

Dennoch, angesichts der Vielzahl der beteiligten Staaten dürfte der Fortschritt wahrscheinlich nur langsam und nicht ambitioniert genug vonstattengehen. Ein Voranschreiten auf europäischer und/oder nationaler Ebene ist deshalb unbedingt nötig.

5.1.2.4 Abbau von Subventionen über eine Weiterentwicklung der Besteuerung

Aktuell wird Kerosin in keinem EU-Mitgliedstaat besteuert. Diese Kerosinsteuerbefreiung führt zu hohen Umweltbelastungen, weil sie das Wachstum des Luftverkehrs fördert und auf betriebswirt-

schaftlicher Ebene die Anreize verringert, verbrauchsarme Luftfahrzeuge zu entwickeln und einzusetzen. So sind die Luftverkehrsleistung und die damit verbundenen CO₂-Emissionen des Luftverkehrs in den vergangenen Jahren erheblich schneller gewachsen als der emissionsmindernde technische Fortschritt in der Luftfahrzeugs- und Triebwerksentwicklung.

Lange galt ein EU-weites Verbot einer Kerosinbesteuerung. Die EU-Energiesteuerrichtlinie von 2003⁴⁵ erlaubt mittlerweile jedoch die Besteuerung des Kerosins für Inlandsflüge sowie zwischen Mitgliedstaaten, falls dafür bilaterale Abkommen vorliegen. Grundsätzlich ist demnach eine EU-weite Kerosinsteuer möglich. Allerdings bestehen von Seiten einiger Mitgliedstaaten starke Widerstände, sodass – verstärkt durch das Einstimmigkeitsprinzip in Steuerfragen – die Einführung einer EU-weiten Steuer schwierig ist.

Auf internationaler Ebene schränken das Chicagoer Abkommen sowie bilaterale Abkommen, z. B. das Open Skies Abkommen, die Besteuerung der Treibstoffe im Luftverkehr ein. Das Chicagoer Abkommen verbietet jedoch nur die Besteuerung des Kerosins, das sich bereits an Bord befindet und dem internationalen Weiterflug dient. Die Besteuerung von Kerosin, das für internationale Flüge an europäischen Flughäfen getankt wird, wäre also bei Änderung entgegenstehender bilateraler Abkommen durchaus möglich.

Trotz der bestehenden Schwierigkeiten ist zur steuerlichen Gleichbehandlung der Verkehrsträger eine möglichst weiträumige – EU-weite – Kerosinsteuer in Ergänzung zu einem deutlich lenkungswirksameren EU-ETS anzustreben. Die Besteuerung des Kerosins sollte also zusätzlich zur Einbeziehung des Luftverkehrs in das EU-Emissionshandelssystem erfolgen. Während der Emissionshandel als Klimaschutzinstrument dient, handelt es sich bei der Kerosinsteuer primär um eine rein fiskalisch begründete Verbrauchsteuer, die grundsätzlich auch bei anderen Verkehrsträgern anfällt. Ziel ist, die bestehende steuerliche Ungleichbehandlung abzubauen. Als Einstieg empfiehlt das UBA den Mindeststeuersatz der EG-Energiesteuerrichtlinie von 33,0 Cent/l zu erheben.⁴⁶ Sollte eine Reform des EU-ETS für den Luftverkehr nicht in dem vom UBA empfohlenen Umfang gelingen, müsste der Steuersatz deutlich höher ausfallen. Da die Einführung einer EU-weiten Steuerlösung aus heutiger Perspektive unsicher erscheint, empfiehlt das UBA, zunächst mit der zeitnahen Einführung einer Kerosinsteuer für nationale Flüge in Deutschland zu beginnen, auch hier zunächst in Höhe des Mindestsatzes (Abschnitt 5.2.2.1). Das UBA schlägt in einem zweiten Schritt vor, dass Deutschland mit anderen europäischen Vorreiterstaaten bilaterale Verträge zur Einführung einer Kerosinsteuer für Flüge zwischen diesen Staaten einführt. Diese können den Kern einer künftigen EU-weiten Steuerlösung bilden. Diese sollte bis 2030 umgesetzt sein.

Der grenzüberschreitende gewerbliche Luftverkehr ist in Europa außerdem von der Mehrwertsteuer befreit. Nur in einzelnen Mitgliedstaaten sind inländische Flüge mehrwertsteuerpflichtig, so etwa in Deutschland. Diese Steuerbefreiung begünstigt den Luftverkehr gegenüber anderen Verkehrsträgern und ist daher entsprechend der Kerosinsteuerbefreiung abzubauen. Für die Mehrwertsteuerbefreiung des internationalen Luftverkehrs ist eine EU-weite Lösung sinnvoll, um einheitliche Rahmenbedingungen für die Verkehrsträger zu schaffen und Wettbewerbsverzerrungen durch Abwanderung von Passagieren zu vermeiden. Möglich wäre dies durch eine Reform der EU-Mehrwertsteuerrichtlinie. Würde die Gesetzeslage so verändert, dass im Land des Abfluges die Mehrwertsteuer für den gesamten Flug erhoben werden könnte, so hätte dies eine beträchtliche ökologische Lenkungswirkung bei geringem administrativem Aufwand. Eine Doppelbesteuerung im europäischen Raum würde dadurch ausgeschlossen. Da aber auch die Einführung einer EU-weiten Mehrwertsteuerlösung aus heutiger Perspektive unsicher erscheint, empfiehlt das UBA,

⁴⁵ Art. 14, Richtlinie 2003/96/EG des Rates vom 27. Oktober 2003 zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32003L0096>.

⁴⁶ Zur Verwendung der zusätzlichen Einnahmen der in Abschnitt 5.1.2.4 beschriebenen Maßnahmen vgl. Abschnitt 5.2.2.2.

zunächst die Luftverkehrssteuer soweit anzuheben, dass die Steuerausfälle durch die Mehrwertsteuerbefreiung grenzüberschreitender Flüge ausgeglichen werden (Abschnitt 5.2.2.1).

5.1.2.5 Gesetzliche Vorgaben zur Preisgestaltung von Umsteigeflügen

Auf mittleren Strecken ist eine Zwischenlandung aus Umweltschutzsicht nicht sinnvoll. Sie erhöht nicht nur den Kraftstoffverbrauch, sondern erzeugt am Ort der Zwischenlandung zusätzliche Geräusch- und Schadstoffemissionen. Hinzu kommt, dass ggf. ein Umweg entsteht. Passagiere und Fracht sollten auf diesen Relationen daher möglichst direkt fliegen. Aus Zeit- und Bequemlichkeitsgründen sind Direktflüge ohnehin attraktiver. Was Passagiere dennoch zu Umsteigeflügen veranlasst, sind häufig die Flugpreise. Fluggesellschaften, die auf einer Relation selbst keine Direktflüge anbieten, bieten z.T. Umsteigeflüge über ihre Drehkreuze (Hubs) an, um an diesen Marktsegmenten teilzuhaben und so die Auslastung ihrer Flugzeuge zu erhöhen. Dies kann dazu führen, dass Umsteigeflüge billiger angeboten werden als Direktflüge. Hier könnten gesetzliche Vorgaben zur Preisgestaltung helfen. Ein Gebot der Additivität könnte vorgeben, dass ein Umsteigeflug nicht billiger sein darf, als wenn beide Flüge einzeln gebucht werden.

5.1.3 Einführungsstrategie für postfossile Kraftstoffe

Im Folgenden werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie postfossile Kraftstoffe bis 2030 im Luftverkehr etabliert werden können, um längerfristig den Einsatz fossilen Kerosins obsolet zu machen.

Mit der heutigen Antriebstechnik müssen flüssige Kohlenwasserstoffe als Treibstoffe eingesetzt werden. Nur sie haben den Vorteil der hohen gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte. Wegen der weltweit engen Vernetzung des Luftverkehrs muss eine einheitliche Energieversorgung auf allen Flughäfen gewährleistet sein. Parallele Infrastrukturen würden zusätzliche Kosten verursachen. Auch deshalb ist ein Wechsel auf eine grundsätzlich andere Energieversorgung mittelfristig nicht zu erwarten.

Beim Verbrennen von Kraftstoffen – auch von erneuerbaren Kraftstoffen – wird weiterhin Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt. Erneuerbare Kraftstoffe enthalten jedoch Kohlenstoff, der nicht zu mehr CO₂-Emissionen führt und meist zuvor der Luft als CO₂ entzogen wurde. Mögliche postfossile Optionen, die diese Bedingungen erfüllen, sind Biokraftstoffe sowie aus erneuerbarem Strom hergestelltes PtL-Kerosin (Schmied et al., 2015).

Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse sind hinsichtlich der Nachhaltigkeit ihrer Rohstoffe sehr problematisch. Zudem steht ihre energetische Nutzung in Konkurrenz zu anderen Nutzungen von Biomasse. Da eine Ausweitung der energetischen Nutzung von Biomasse zwingend entweder zu intensiverer Flächenbewirtschaftung oder zur Neugewinnung von landwirtschaftlicher Fläche führt und beides mit erhöhten Treibhausgasemissionen verknüpft ist, kann eine Kraftstoffoption aus Anbaubiomasse die Entstehung von Treibhausgasemissionen nicht vollständig vermeiden (Jering et al., 2013). Aus diesen Gründen sieht es das UBA als nicht sinnvoll an, Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse im Luftverkehr sowie generell im Verkehr einzusetzen. Biokraftstoffe aus Abfall- oder Reststoffen haben diese Nachteile nicht⁴⁷ ⁴⁸. Ihr Mengenpotenzial ist global und insbesondere national jedoch sehr begrenzt. Selbst falls sie nicht in anderen Sektoren als dem Luftverkehr Verwendung fänden, könnten sie aufgrund der Nutzungskonkurrenz mit anderen Verbrauchssektoren (andere energetische und stoffliche Nutzung) nur einen Anteil des Endenergiebedarfs des Luftverkehrs decken (Schmied et al., 2015); (Fehrenbach et al., 2019).

⁴⁷ Falls diesen Stoffen keine Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung der Biomasse angerechnet wird.

⁴⁸ Kein Flächenbedarf und damit auch geringere soziale Risiken, geringere Nutzungskonkurrenzen (wobei auch hier Verdrängungseffekte beachtet werden müssen).

Im Vergleich zu Biokraftstoffen ist PtL-Kerosin, das mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird, hinsichtlich des Flächen- und Wasserbedarfs und insbesondere bezüglich der Treibhausgasemissionen deutlich vorteilhafter⁴⁹ (Schmidt et al., 2016). Für das Ziel eines treibhausgasneutralen Luftverkehrs müsste der größere oder der gesamte Anteil des Endenergiebedarfs für den Luftverkehr also über nachhaltiges PtL bereitgestellt werden.

Um Fehler bei der Risikoabschätzung und Vorgehensweisen wie im Biokraftstoffsektor zu vermeiden, müssen bei einem PtL-Einstiegspfad frühzeitig verpflichtende Nachhaltigkeitsstandards für die Strom- und PtL-Produktion (inklusive für die Bereitstellung des Kohlenstoffes) entwickelt und mitberücksichtigt werden, z. B. hinsichtlich der Additivität der Stromerzeugungskapazität aus erneuerbaren Energien⁵⁰, der Nutzung von Wasser und Landflächen, der Sozialverträglichkeit und Wirtschaftsentwicklung der Brennstoffproduktion in den Erzeugerländern (Perner et al., 2018); (Purr et al., 2016).

Nachteile von PtL liegen in der verlustbehafteten Herstellung⁵¹ und in den im Vergleich zu fossilen Kerosin hohen Herstellungskosten. Da die Bereitstellungskosten von nachhaltigem PtL auch langfristig als hoch eingeschätzt werden und die Schonung von natürlichen Ressourcen zu berücksichtigen ist, muss der Fokus noch stärker auf die Steigerung der Effizienz des Luftverkehrs liegen, damit der verbleibende Kerosinbedarf leichter gedeckt werden kann.

Derzeit gibt es keine kommerziell produzierenden PtL-Anlagen für Kerosin. Insofern kann ein vollständiger Ersatz fossilen Kerosins durch nachhaltiges PtL nur langfristig stattfinden. Damit das bis 2050 erreichbar wird, muss ein Einstieg in die kommerzielle Herstellung sehr bald erfolgen (Purr et al., 2019). Es sind jedoch bisher nur wenige Versuchsanlagen vorhanden. Zunächst werden daher Pilot- und Demonstrationsanlagen benötigt, die die Techniken in ihrer Gesamtheit demonstrieren⁵² (Brinner et al., 2018); (Arnold et al., 2017). So ließe sich der Wissenstransfer gewährleisten, die erforderliche technische Weiterentwicklung anregen und über eine Markteinführung letztlich Lernkurveneffekte anstoßen, die zu einer schrittweisen Kostendegression führen. Eine umfassende und über Demonstrationsanlagen hinausgehende Förderung inländischer PtG/PtL-Anlagen ist wegen vergleichsweise teuer zu hebender erneuerbaren Energien-Potentiale in Deutschland derzeit nicht zielführend.

Das UBA befasst sich in der Studie „RESCUE - Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“ (Purr et al., 2019) mit möglichen Wegen zur Reduzierung der deutschen (und Deutschland zuzurechnenden) Treibhausgasemissionen bis 2050. Verschiedene Szenarien zeigen einen möglichen Lösungsraum zur Treibhausgasneutralität von Deutschland bis 2050 auf. So ergibt sich z. B. unter den Annahmen des Szenarios „GreenEe1“, dass bereits 2030 knapp 12 TWh synthetisch hergestelltes, treibhausgasneutrales PtL im Luftverkehr zum Einsatz kommen. Das entspricht rund 10 % des heute insgesamt in Deutschland in den Verkehr gebrachten getankten Flugkraftstoffs.

⁴⁹ Voraussetzung ist die Verwendung erneuerbaren, treibhausgasneutralen Stroms zur Herstellung von PtL. Wird Strom aus fossilen Energieträgern, wie Kohle oder Erdgas, verwendet, schlägt dessen CO₂-Belastung auf das Produkt PtL so stark durch, dass dies ein Mehrfaches im Vergleich zur direkten Nutzung fossiler Energieträger ausmacht. Das wäre faktisch „Coal/Natural Gas to Liquid“ (Purr et al., 2016).

⁵⁰ Der Strom zur Herstellung von PtL sollte aus zusätzlich errichteten Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms stammen, damit kein erneuerbarer Strom Nutzungen mit höheren Treibhausgasminderungswirkung verwendet wird.

⁵¹ Energetisch geht ein Großteil der Energie des Strominputs verloren.

⁵² Nicht zuletzt sind noch verfahrenstechnische Weiterentwicklungen erforderlich, gerade im Zusammenspiel der Komponenten Stromerzeugung, Elektrolyse und der CO₂-Gewinnung aus der Luft, sowie der Dauerhaltbarkeit der zur Elektrolyse eingesetzten Materialien. Häufig fehlen je nach Katalysatormaterial beispielsweise aromatische Verbindungen im PtL-Kraftstoff. Damit ist dieser derzeit als vollständiges Substitut für Diesel einsetzbar, nicht jedoch für Benzin oder Kerosin. Hier ist es mittelfristig notwendig, entweder auf Verkehrsträgerseite die Flugtriebwerke technisch weiter zu entwickeln und zu optimieren, oder die PtL-Technik anzupassen.

Es ist davon auszugehen, dass die gesamte in Deutschland benötigte Menge synthetisch hergestellter Energieträger nicht ausschließlich inländisch produziert werden kann. Vielmehr lassen die Herstellungskosten für erneuerbaren Strom – als wesentlicher kostenbestimmender Input – sowie andere Faktoren erwarten, dass inländisch nur ein begrenzter Anteil der insgesamt für Deutschland benötigten Menge produziert werden wird (Perner et al., 2018). In den Szenarien der RESCUE-Studie (Purr et al., 2019), werden diese vollständig 2030 importiert. Es sind also Strategien notwendig, die andere Staaten bei der Herstellung von PtL, der Technikentwicklung und dem Verbrauch von PtL mit einbeziehen. Auch muss ein notwendiger Rahmen geschaffen werden, der es ermöglicht, die Herstellungskapazitäten zügig aufzubauen und nachhaltiges PtL zur Anwendung zu bringen⁵³. Dieser wäre idealerweise verzahnt mit einem Rahmen zur sektorübergreifenden⁵⁴ Einführung synthetischer Energieträger.

Die Reform des EU-ETS (Abschnitt 5.1.2.1) wird die Kosten für die Fluggesellschaften bis 2030 deutlich erhöhen, da diese künftig mehr Emissionsberechtigungen bei gleichzeitig steigenden Preisen am Kohlenstoffmarkt zum Ausgleich ihrer CO₂-Emissionen erwerben müssen. Mit dem Einsatz von PtL können Luftfahrzeugbetreiber ihre Abgabelast im EU-ETS verringern. Zudem reduziert die Einführung einer Kerosinsteuer das Preisgefälle zwischen PtL und konventionellem Kerosin. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese Instrumente noch nicht ausreichend sind, um bis 2030 die Marktintegration von nachhaltigen PtL im erforderlichen Maße zu ermöglichen und damit die langfristige Verfügbarkeit in den erforderlichen Mengen zu gewährleisten.

Als zentralen Baustein einer Einführungsstrategie empfiehlt das UBA daher eine verpflichtende Beimischquote als energetischen Mindestanteil an nachhaltigem PtL, der dem insgesamt zu verbrauchenden Kerosin beizumischen ist (Purr et al., 2016). Diese muss allerdings adäquat ausgestaltet und mit dem bestehenden Klimaschutzinstrumentarium abgestimmt werden. Bei der Ausgestaltung der Beimischquote sind insbesondere Kriterien zu berücksichtigen, die den tatsächlich genutzten Strom widerspiegeln, sodass kein Strom aus fossiler Energie (Coal to liquid, Gas to Liquid) oder aus Anbaubiomasse, sondern zusätzliche erneuerbare Energie für PtL genutzt wird (Purr et al., 2016). Genauso sind die gesamtsystemischen Treibhausgaseffekte und Nachhaltigkeitsaspekte, bzgl. der Kohlenstoffquelle, Wasser und Fläche, zu beachten.

Die Höhe der jährlichen PtL-Quote sollte an der voraussichtlichen Entwicklung der Herstellungskapazitäten für den Treibstoff, in erster Linie aber am Klimaschutzanfordernis von 100 % treibhausgasneutralen Kerosins in 2050 ausgerichtet werden. Im Fall einer zunächst nationalen Regelung wird in Anlehnung an die RESCUE-Studie (Purr et al., 2019) eine Beimischquote an nachhaltigen PtL von 10 % im Jahr 2030^{55 56} vorgeschlagen. Zur Planungssicherheit für Investoren und Betreiber der PtL-Anlagen sollte die PtL-Beimischquote bereits für einen längeren Zeitraum gesetzlich festgelegt werden, der sich an der erwarteten Standzeit der Produktionsanlagen orientiert.

Als regulatorischen Ansatzpunkt empfiehlt das UBA die Inverkehrbringer von Kerosin in Deutschland zu verpflichten. Diese stellen das PtL im Gemisch mit fossilem Kerosin bereit. Damit würde

⁵³ Vor dem Hintergrund des Übereinkommens von Paris muss die Treibstoffversorgung bis 2050 treibhausgasneutral sein. Hierfür müssen frühzeitig die entsprechenden Entwicklungen angereizt und Weichen gestellt werden. In der UBA-Studie RESCUE werden mehrere solcher Transformationspfade hin zur Treibhausgasneutralität aufgezeigt. In den dortigen Green-Szenarien ergeben sich bis 2030 szenarienabhängig zwischen 8 und 21TWh (die meisten Szenarien liegen bei 11/12 TWh) erneuerbare Treibstoffe aus PtL für den Luftverkehr in Deutschland. Zum großtechnischen Aufbau der gesamten Herstellungskette – erneuerbare Stromerzeugung, Kohlenstoffgewinnung, Wasserbereitstellung und PtL-Produktion – erfordern die verbleibenden 10 bis 11 Jahre beginnend von den planerischen Arbeiten bis hin zum Bau und Inbetriebnahme bereits heute ein schnelles Handeln.

⁵⁴ Insbesondere Synergien zur Entwicklung der chemischen Industrie hin zur Treibhausgasneutralität sind zu heben.

⁵⁵ Als energetischen Mindestanteil.

⁵⁶ Quoten für Zeitpunkte vor 2027 festzulegen ist wahrscheinlich nicht sinnvoll, da die Zeit bis dann erforderlich ist, um die ersten Produktionsanlagen projektieren, genehmigen und bauen zu können.

die Inverkehrbringung von Kerosin in Deutschland künftig nur noch mit einem PtL-Anteil von zunächst 10 % möglich sein. Neben dem Kerosin-PtL-Gemisch sollte aber zusätzlich eine Betankung von reinem nachhaltigen PtL möglich sein, um den Anteil an PtL nach individuellem betriebswirtschaftlichem Kostenkalkül zu steigern. Eine alternative Verpflichtung der Fluggesellschaften erscheint nicht zielführend. Ansatzpunkt wäre hier der Kerosinverbrauch auf Flügen, die von deutschen Flughäfen starten. Die Erfahrungen aus dem EU-ETS und die laufenden Verhandlungen zu CORSIA geben aber ausreichend Grund zur Annahme, dass eine solche Verpflichtung von Drittstaaten-Airlines auf internationalen Flügen absehbar nicht durchsetzbar ist. Die Gleichbehandlung von deutschen und ausländischen Fluggesellschaften ist aber aus Wettbewerbsperspektive eine Grundvoraussetzung für die Einführung einer PtL-Beimischquote.

Erfüllen die Inverkehrbringer als Verpflichtete die Beimischquote nicht, wird von der aufsichtführenden Stelle eine Strafzahlung erhoben. Die Höhe der Zahlung richtet sich nach der verfehlten Menge und dem Bereitstellungspreis für PtL. Die Einnahmen aus den Strafzahlungen werden zur Markteinführung von nachhaltigen PtL im Luftverkehr genutzt, genauso wie es für einen Teil der Einnahmen aus der Luftverkehrssteuer und Kerosinsteuer vom UBA vorgeschlagen wird (Abschnitt 5.2.2.2).

Ambitionierter Klimaschutz verlangt baldiges Handeln. Die Einführung einer Quote erscheint dem UBA auf nationaler Ebene als am schnellsten umsetzbar. Dennoch sollte die Bundesregierung für eine Lösung auf EU-Ebene eintreten, zugleich aber als ersten Schritt ein gemeinsames Vorgehen mit einzelnen aufgeschlossenen Staaten innerhalb und außerhalb der EU suchen⁵⁷. Im Fall einer europaweiten Regelung müsste die Höhe der Quote im Zeitverlauf von der Europäischen Kommission bestimmt werden. Hier gelten die gleichen Maßgaben, um Planungssicherheit für Investitionen zu gewährleisten.

Eine Herausforderung, die sich aus einer zunächst nationalen PtL-Quote ergibt, ist die Vermeidung von sogenanntem „Tankering“, also dem Ausweichen auf Betankungsmöglichkeiten außerhalb Deutschlands. Der potenzielle Umfang dieses Problems hängt im Wesentlichen von dem künftigen Kostenunterschied zwischen dem Einsatz von ausländischem Kerosin und dem inländischen Kerosin-PtL-Gemisch ab.

Neben der Beimischquote ist ein zweiter zentraler Baustein für eine erfolgreiche Einführungsstrategie von PtL die Schaffung eines „Innovations- und Demonstrationsfonds Luftverkehr“, der sich anteilig aus dem Aufkommen der Luftverkehrssteuer und der Kerosinsteuer speisen soll und in Abschnitt 5.2.2.2 skizziert wird. Ein zentrales Ziel dieses Fonds ist die Unterstützung der Markteinführung von PtL. Hierunter fallen insbesondere Maßnahmen, die die Herstellungskosten postfossiler Kraftstoffe senken, etwa anwendungsnahe Forschungsvorhaben oder weitergehende Investitionsförderungen. So könnten Pilot- und Demonstrationsanlagen unterschiedlicher Reifegrade hinsichtlich Kapital- und auch operativer Mehrkosten gefördert werden.

Im Verbund mit einem reformierten EU-ETS und einer Kerosinsteuer kann der Fonds dafür sorgen, dass die Kostenunterschiede zwischen ausländischem Kerosin und dem in Deutschland verpflichtenden Kerosin-PtL-Gemisch schrittweise abgebaut werden und so Tankering verhindern. Außerdem kann der Fonds über seine differenzierte Ausgestaltung insbesondere die Wirtschaftlichkeit von Pilotanlagen garantieren.

Folgende technische Herausforderungen sollten mithilfe des Fonds angegangen werden:

- ▶ Demonstrationsanlagen zur verfahrenstechnischen Optimierung des Zusammenspiels der Techniken,

⁵⁷ So zeigen sich etwa ähnliche Bestrebungen in den Niederlanden, Norwegen, Frankreich und Spanien (manche hinsichtlich fortschrittlicher Biokraftstoffe).

- ▶ Großtechnische Erprobung von Komponenten,
- ▶ Forschung zur Technologieentwicklung, wie z. B. Hochtemperaturelektrolyse, CO₂-Gewinnung aus Luft⁵⁸, Wasseraufbereitung, Katalysatormaterialien, um die energetische Effizienz zu steigern sowie
- ▶ Verfahren zur Steigerung des Kerosinanteils aus dem Fischer-Tropsch-Syntheseprodukt.

Mit der zeitigen Weiterentwicklung und Förderung der Techniken in Deutschland kann sich die Möglichkeit zum späteren Technologieexport eröffnen. Deutschland ist für einige Teiltechniken gut aufgestellt. No-regret-Techniken sind aus Sicht des UBA die Wasserelektrolyse (insbesondere die Hochtemperaturelektrolyse) und „Direct Air Capture“ (DAC). Beide Techniken werden aus Sicht des UBA zukünftig in erheblichem Ausmaß auch in anderen Wirtschaftsbereichen benötigt.

Die Herstellung von PtL wird zukünftig aber überwiegend dort stattfinden, wo günstige Bedingungen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gegeben sind. Das trifft auf globale Gunststandorte für Solarenergie, Windenergie an Land und auf See sowie Geothermie zu. Damit erhält die Herstellung von PtL eine industrie- und entwicklungspolitische Komponente (z.B. Technikexport, internationale Zusammenarbeit, Arbeitsplätze). Die Einbindung anderer Staaten kann dort die Akzeptanz für eine globale Strategie fördern und Perspektiven für sie aufzeigen.

Von einem Wechsel auf postfossile Kraftstoffe wenig berührt bleiben die Nicht-CO₂-Effekte, die durch Emissionen in Reiseflughöhe aus den Strahltriebwerken der Flugzeuge direkt oder indirekt ausgelöst werden. Sie wirken weiterhin auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und beeinflussen das Klima. Möglichkeiten zur Verringerung sind in Abschnitt 5.1.5 genannt.

5.1.4 Flugroutenmanagement

Der Single European Sky (SES) ist eine Initiative der Europäischen Kommission, die eine effizientere Nutzung des Luftraums in der European Common Aviation Area (ECAA)⁵⁹ zum Ziel hat. Während bislang die Flugsicherung in der Regel von nationalen Institutionen für das jeweilige Hoheitsgebiet wahrgenommen wurde, sollen künftig funktionale Luftraumblöcke (Functional Airspace Block – FAB) entstehen, in denen der Luftverkehr ungeachtet der Landesgrenzen ganzheitlich abgewickelt wird. Deutschland, Frankreich, die Beneluxländer und die Schweiz gehören dem FAB Europe Central (FABEC) an. Seit März 2018 ist für große Teile des oberen Luftraums in Deutschland der Free Route Airspace verfügbar. Dieser erlaubt es, unabhängig von den bisherigen Luftstraßen ein Ziel direkt anzusteuern. Umwege entstehen aber nicht nur aufgrund von Landesgrenzen, daher soll im SES auch die Zusammenarbeit zwischen militärischer und ziviler Luftfahrt verbessert werden. Auch unnötige Warteschleifen sollen minimiert werden.

Die effizientere Nutzung des europäischen Luftraums ist grundsätzlich ökonomisch und ökologisch zu begrüßen. Die Minderungspotentiale bei Kraftstoffverbrauch und CO₂ werden auf 10 % geschätzt, optimistische Prognosen gehen von bis zu 15 % Einsparpotential aus. Der besondere Vorteil des SES liegt darin, dass die Maßnahme ihre Wirkung sofort entfaltet. Außerdem können Synergien zwischen Klimaschutz und Kostenersparnis genutzt werden. Wichtig ist aber auch, dass die frei werdenden Kapazitäten und die Kostensenkungen nicht zur Erzeugung von zusätzlichem Luftverkehr führen dürfen. Daher ist es notwendig, mit Instrumenten wie dem Emissionshandel und Steuern Kostengerechtigkeit herzustellen, um das volle Klimaschutzpotential des SES heben zu können.

⁵⁸ DAC bzw. Direct Air Capture. Für die benötigten Quantitäten PtL in allen Sektoren wird diese Technik erforderlich sein Da im Zeitraum nach 2050 voraussichtlich global gesehen negative Emissionen erforderlich sein werden um die Klimaziele einzuhalten, könnte DAC dann großtechnisch eingesetzt werden müssen. Damit wäre die besondere Förderwürdigkeit begründbar.

⁵⁹ = EU + weitere europäische Staaten.

5.1.5 Minderung der Nicht-CO₂-Klimaeffekte

Die Nicht-CO₂-Effekte werden durch Emissionen von Partikeln, Wasserdampf, Schwefel- und Stickoxiden ausgelöst. Die Emissionen wirken teils direkt, wie der Wasserdampf, größtenteils jedoch indirekt, d. h. durch physikalische Prozesse und chemische Umwandlungen in der Atmosphäre entstehen erst die strahlungsverändernden Substanzen (Abschnitt 3.2). Deren Wirkung hängt stark von den chemischen und meteorologischen Hintergrundbedingungen des Emissionsraums sowie vom Zeitpunkt der Emission (Jahreszeit, Tageszeit) ab. Die meisten dieser Effekte zeichnen sich durch sofortige Wirkung, aber eine vergleichsweise kurze Wirkungsdauer aus, anders als beim über Jahrhunderte wirkenden CO₂.

Gemindert werden können die Nicht-CO₂-Effekte, indem

1. die Emissionen der verursachenden Substanzen grundsätzlich geringer werden,
2. weniger in Räume besonderer Klimasensitivität emittiert wird und
3. weniger zu Zeiten besonderer Klimasensitivität emittiert wird.

Notwendige Voraussetzungen für die beiden letztgenannten Punkte sind, dass

- ▶ der Luftraum nicht schon maximal voll ist, sodass Flugtrajektorien veränderbar sind,
- ▶ alternative Flugrouten nicht so viel länger sind, dass der mit der längeren Strecke einhergehende höhere Kerosinverbrauch und die entsprechend höheren CO₂-Emissionen zu einer insgesamt größeren Klimawirkung führen,
- ▶ idealerweise eine präzise Wettervorhersage für Raum und Zeit des jeweiligen Fluges zur Verfügung steht, sodass die potenzielle Klimawirkung aufgrund der erwarteten Emissionen des Flugzeugs möglichst genau voraus berechenbar ist, und
- ▶ die Flugsicherheit nicht beeinträchtigt wird.

Allerdings gibt es derzeit praktische Einschränkungen, sodass das Potenzial nicht voll ausgeschöpft werden kann. So ist das Luftraummanagement nicht flexibel genug. Auch sind Wettervorhersagen für den Verlauf der Trajektorien noch nicht ausreichend genau. Zudem müsste, für eine genaue Abwägung einer aus Umwelt- bzw. Klimaschutzsicht idealen Trajektorie, die Klimawirkung des konkreten Fluges genau bekannt sein. Allerdings ist die Klimawirkung bzw. strahlungsverändernde Wirkung mancher Nicht-CO₂-Effekte noch nicht völlig verstanden und auch noch nicht ausreichend quantifizierbar (Abschnitt 3.2). Zwar befasst sich neuere Forschung beispielsweise mit der Optimierung von Flugtrajektorien hinsichtlich der Klimawirkung und der ökonomischen Wirkung auf den Luftfahrzeugbetreiber, um die o. a. Maßnahmen effektiv umzusetzen ist es jedoch erforderlich, dass die Forschung auf diesen Gebieten intensiviert wird, um die Voraussetzungen bis 2030 zu schaffen.

Die Nicht-CO₂-Effekte werden in Zukunft durch das Anwachsen des Luftverkehrs aller Voraussicht nach noch an Bedeutung gewinnen. Um sie weitestgehend zu mindern, sind alle der drei o. a. Maßnahmen zu ergreifen, siehe auch (Niklaß et al., 2017). Diese werden im Folgenden noch weiter ausgeführt:

1. Minderung des Ausstoßes klimawirksamer Substanzen
 - ▶ Kerosinverbrauch und CO₂-Emissionen sind proportional zueinander⁶⁰. Zugleich ist der Kerosinverbrauch eine wesentliche Größe in den Betriebskosten von Flugzeugen und ein wesentlicher Treiber für Effizienzmaßnahmen. Die CO₂-Emissionen je Personenkilometer

⁶⁰ Die Verbrennung einer Tonne Kerosin führt unter idealen Bedingungen zur Entstehung von 3,15 Tonnen CO₂.

(Pkm) konnten in den letzten 50 Jahren um mehr als 60 % gesenkt werden (Lee et al., 2009).

- ▶ In ähnlicher Weise könnten die für die Nicht-CO₂-Effekte verantwortlichen Emissionen durch technische Weiterentwicklungen gemindert werden, zum Beispiel NO_x und Partikel. Allerdings können nicht alle Emissionen zugleich optimiert werden. So gibt es beispielsweise zwischen CO₂- und NO_x-Emissionen einen Trade-off: Die Kraftstoffeffizienz wurde verbessert durch erhöhte Druckverhältnisse in den Strahltriebwerken der Flugzeuge. Diese Veränderung erhöht die Verbrennungstemperatur, wodurch mehr thermisches NO_x entsteht. NO_x sind Vorläufer für mehrere strahlungsverändernde Effekte⁶¹, die zumindest für Ozon in Reise Flughöhe von 8 bis 12 km stärker als in Bodennähe wirken (Lee, 2018). Es ist somit abzuwägen, welches Verhältnis der Emissionen von NO_x und CO₂ unter Klimaschutzaspekten optimal wäre. Wenn dies wissenschaftlich geklärt ist, sollten die Zulassungsanforderungen für Luftfahrzeuge bezüglich dieser Substanzen entsprechend weiterentwickelt werden (Abschnitt 5.1.1.2).

2. Restriktionen für Lufträume besonders starker Klimawirkung

- ▶ Lufträume, die aufgrund ihrer meteorologischen Bedingungen besonders sensitiv auf die hier betrachteten Emissionen reagieren, d. h. in denen die Klimawirkung von Emissionen und Folgeprodukten deutlich höher als in anderen Lufträumen ist, könnten aus Sicht des UBA für den Luftverkehr gesperrt werden. Dies betrifft im Allgemeinen unterschiedliche Luftschichten bzw. Flughöhen, in denen je nach Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druckverhältnissen entsprechende Bedingungen herrschen. Alternativ zu solchen Durchflugverboten könnten die Nicht-CO₂-Effekte bzw. die resultierenden Klimakosten auch in Form einer ökonomischen Regelung berücksichtigt werden. Denkbar wäre eine Durchfluggebühr zu erheben, die sich an den Klimakosten orientiert. Letzteres würde den Luftraum, der dem Luftverkehr zur Verfügung steht, nicht verkleinern. Das UBA spricht sich für eine Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte im Rahmen eines weiterentwickelten EU-ETS aus (Abschnitt 5.1.2.2).
- ▶ In der Regel können Nicht-CO₂-Effekte durch Fliegen in geringeren Höhen reduziert werden. Studien zeigen, dass die Effekte der Wolkenbildung und des Ozons grundsätzlich reduziert werden können, wenn die Flughöhe gesenkt wird z. B. (Husemann et al., 2019), (Lee et al., 2009). Tiefere Luftschichten haben aber eine größere atmosphärische Dichte, was den Luftwiderstand vergrößert und den Kraftstoffverbrauch erhöht. Wenn die CO₂-Effekte wie die Nicht-CO₂-Effekte in sachgerechter Art und Weise im EU-ETS Berücksichtigung finden, kann der Flug hinsichtlich seiner übergreifenden Klimawirkung optimiert werden. Dies hat dann die geringsten Zertifikatskosten für den Luftfahrzeugbetreiber zur Folge.

3. Restriktionen für Zeiten besonders starker Klimawirkung

- ▶ Die konkreten meteorologischen Bedingungen verändern sich ständig. Daher können sich besonders klimasensitive Bedingungen auch nur zeitweilig – über Stunden, Tage oder Mo-

⁶¹ Verstärkte Ozonbildung in der Atmosphäre, Bildung kurzlebiger Hydroxylradikale, die zum Methanabbau in den oberen Luftschichten führen, langfristig verminderte natürliche Ozonbildung, weniger Wasserdampf in der Stratosphäre.

nate – ergeben. Die o. a. Durchflugverbote sollten dann temporär erfolgen. Solange keine ausreichend präzise Wettervorhersage für den durchflogenen oder zu durchfliegenden Luftraum möglich ist, könnte vereinfachend die durchschnittliche meteorologische Situation als Basis zur Berechnung der Klimawirkung dienen. Dabei muss die Klimawirkung zunächst für jeden Effekt separat berechnet werden, um anschließend für alle Effekte gemeinsam ermittelt zu werden. Allmählich sich verbessernde Kenntnisse über die Wirkzusammenhänge könnten schrittweise in die Berechnungen einbezogen und die Aussagegenauigkeit verbessern.

Einbindung von Nicht-CO₂-Effekten in den Europäischen Emissionshandel oder CORSIA

Als übergeordnetes Instrument zur Einbindung der o. a. Maßnahmen bieten sich der bereits bestehende, aber diesbezüglich weiterzuentwickelnde Europäische Emissionshandel oder CORSIA an. Das UBA bereitet durch entsprechende Forschung, u. a. im 2019 noch laufenden Forschungsvorhaben „Möglichkeiten der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten im Luftverkehr am Beispiel des EU-ETS und von CORSIA“ Vorschläge vor, wie diese Effekte analog zum CO₂ in den Emissionshandel oder eine marktbasierete Maßnahme eingebunden werden können. So müssen z.B. belastbare Vergleichsdaten bzw. Schätzmethoden zur einheitlichen Beurteilung von berichteten Nicht-CO₂-Klimaeffekten zur Verfügung stehen. Diese sollen es ohne genaue Kenntnis der tatsächlichen Flugroute, der Emissionsmenge und der aktuellen Wettersituation ermöglichen, CO₂-Äquivalente möglichst genau abzuschätzen. Die Berechnungsmethodik soll dabei auf Daten wie beispielsweise der Position des Abflug- und Zielflughafens sowie des verwendeten Flugzeugtypen beruhen.

Entsprechend den in Abschnitten 5.1.2.2 und 5.1.2.3 beschriebenen Mechanismen würden die Nicht-CO₂-Effekte dann einer festgelegten absoluten Obergrenze unterliegen bzw. müssten an anderer Stelle kompensiert werden. Für Betreiber von Luftfahrzeugen werden damit Anreize geschaffen, alle drei der oben genannten Minderungsmaßnahmen zu ergreifen, um die Kosten für die Verursachung von Nicht-CO₂-Effekten zu reduzieren.

Auch die Europäische Kommission hat die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte erkannt. Aus Sicht des UBA sollte bei der für 2020 auf EU-Ebene anstehenden Reform der Regelungen zum Luftverkehr im EU-Emissionshandel eine erweiterte Abgabeverpflichtung zur Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte eingeführt werden (Abschnitt 5.1.2.2).

5.1.6 Übersicht europäischer und internationaler Maßnahmen und Instrumente

In den bisherigen Ausführungen wurden zahlreiche Maßnahmen und Instrumente zum Umwelt- und Klimaschutz beschrieben und bewertet. In Tabelle 9 sind diejenigen, die auf europäischer und internationaler Ebene erforderlich sind, zusammenfassend dargestellt. Dabei ist jeweils der Zeitpunkt angegeben, ab denen diese spätestens wirken sollen sowie die Akteure, die diese beschließen und umsetzen sollen.

Tabelle 9: Zusammenstellung europäischer und internationaler Maßnahmen und Instrumente

Maßnahme und Instrumente	Spätester Wirkungszeitpunkt	Wer beschließt?	Wer setzt um?
Verschärfung der Lärmzulassungsgrenzwerte für Unterschallflugzeuge um kumuliert 20 bis 23 EPNdB gegenüber dem aktuellem Standard	2030	ICAO	Bund, Luftfahrzeughersteller
Verschärfung der Lärmzulassungsgrenzwerte	2050	ICAO	Bund, Luftfahrzeugher-

Maßnahme und Instrumente	Spätester Wirkungszeitpunkt	Wer beschließt?	Wer setzt um?
te für Unterschallflugzeuge um kumuliert 28 EPNdB gegenüber dem aktuellem Standard			steller
Schrittweise Verschärfung der Luftschadstoffzulassungsanforderungen für Luftfahrzeugtriebwerke (insbesondere der NOx-Emissionen auf 10 % gegenüber 2000)	2050	ICAO	Bund, Luftfahrzeughersteller
Schrittweise Verschärfung des CO ₂ -Grenzwertes bei der Luftfahrzeugzulassung auf 45 % des Wertes im Vergleich zum Jahr 2010	2050	ICAO	Bund, Luftfahrzeughersteller
Begrenzung des Tankvolumens von Langstreckenflugzeugen zur Verhinderung von sehr weiten Langstreckenflügen	2030	ICAO	Luftfahrzeughersteller
Nutzung der Potentiale durch Neuregulierung des Luftraumes (Single European Sky-Initiative) zur Vermeidung von Umwegen	2030	EU	Flugsicherung
Zivile Überschallflugzeuge müssen die geltenden Lärm- und CO ₂ -Zulassungsanforderungen für vergleichbare Unterschallflugzeuge erfüllen	2030	ICAO	Bund, Luftfahrzeughersteller
Verbot von zivilen Überschallflügen über Land	2030	ICAO, EU	Fluggesellschaften
Verschärfung Emissionshandel, insbesondere Absenkung des Cap, Nutzungsbeschränkung der Zukäufe von Zertifikaten aus dem stationären Bereich, Berücksichtigung der Nicht-CO ₂ -Effekte	2030	EU	Fluggesellschaften
Verschärfung von CORSIA, insbesondere ambitionierter Reduktionspfad, hochwertige Offsets, Einsatz nachhaltiger alternativer Kraftstoffe	2030	ICAO	Fluggesellschaften
Aufhebung der Energiesteuerbefreiung für Kerosin, Erhebung des EU-Mindeststeuersatzes von 33 Cent	2030	EU	Fluggesellschaften
Aufhebung der Mehrwertsteuerbefreiung für den grenzüberschreitenden gewerblichen Luftverkehr	2030	EU	Fluggesellschaften
Einführung einer PtL-Beimischquote für Kerosin ⁶²	2030	EU	Inverkehrbringer von Flugkraftstoffen
Setzung strenger Nachhaltigkeitskriterien für die PtL-Herstellung	2030	EU-Staaten	Inverkehrbringer von Flugkraftstoffen

⁶² Die Einführung dieser Quote sollte idealerweise auf EU-Ebene oder bilateral zwischen internationalen Staaten erfolgen, erscheint aber auf nationaler Ebene als am schnellsten umsetzbar. Für Deutschland wäre 2030 eine Beimischquote von 10 % zu erreichen. Im Fall einer europaweiten Regelung wäre die Größenordnung einer notwendigen EU-Quote noch zu ermitteln und von der Europäischen Kommission festzulegen.

Maßnahme und Instrumente	Spätester Wirkungszeitpunkt	Wer beschließt?	Wer setzt um?
Verhinderung von Nicht-CO ₂ -Effekten durch zeitweise Sperrung von klimasensitiven Gebieten zur Vermeidung von Zirrenbildung, oder diesbezügliche Durchflugsgebühr	2020	EU	Flugsicherung
Integration der Nicht-CO ₂ -Effekte in einen globalen Klimaschutzmechanismus des Luftverkehrs	2050	ICAO, EU	Fluggesellschaften

5.2 Instrumente und Maßnahmen auf nationaler Handlungsebene

5.2.1 Flughafenplanung in Deutschland

5.2.1.1 Planungsverfahren und Standortentscheidungen für Flughäfen

Zuständigkeiten bei der Flughafenplanung

Die Planung von Flughäfen und die Festlegung ihrer Standorte erfolgt auf verschiedenen räumlichen Planungsebenen. Auf der obersten Ebene steht dabei die Raumordnung mit der Aufgabe, die unterschiedlichen Nutzungsansprüche an den Raum abzustimmen und in Einklang mit den gesellschaftlichen Zielvorstellungen zu bringen. Hierbei sind die sozialen und wirtschaftlichen Ansprüche an den Raum sowie dessen ökologische Funktionen zu berücksichtigen (Spannowsky et al., 2010) sowie die unterschiedlichen öffentlichen und privaten Belange abzuwägen, wie z. B. Ansprüche einzelner Fachplanungen oder private Nutzungsinteressen für den Standort.

Die Länder können ihre Planungen in den jeweiligen Landesentwicklungsplänen und -programmen konkretisieren. Festgelegt werden dabei verbindliche Ziele der Raumordnung, die zu beachten sind, sowie Grundsätze und sonstige Erfordernisse der Raumordnung, die in nachfolgenden Entscheidungen im Rahmen der Abwägung zu berücksichtigen sind. Aufgabe eines Landesentwicklungsplans ist es u. a. neben den möglichen Standorten ggf. grob die für das Vorhaben notwendigen Flächen darzustellen. Darüber hinaus gehören auch die übergeordneten Trassen und Korridore von Straßen und Schienenwegen zur verkehrlichen Anbindung des Standortes dazu. Weitere Festlegungen können etwa eine Planungszone zur Siedlungs- oder Bauhöhenbeschränkung betreffen, bis hin zu Verweisen auf betrieblichen Regelungen, die in den Verfahren nach dem Luftverkehrsgesetz verbindlich festzusetzen sind.⁶³

Festlegungen zu Standorten und Flächennutzungen können in Regionalplänen auf Basis der Festlegungen der Landesentwicklungspläne oder -programme erforderlichenfalls erstmals festgelegt oder weiter präzisiert werden.

In den Raumordnungsplänen werden die Flächen, die für einen Flughafen genutzt werden sollen, noch nicht parzellenscharf festgelegt und entfalten daher auch noch keine Genehmigungswirkung.

Standortprüfung im Raumordnungsverfahren

Die Bundesregierung hat in § 1 Nr. 12 der Raumordnungsverordnung festgelegt, dass für Flughäfen ein Raumordnungsverfahren durchgeführt werden soll, wenn sie im Einzelfall raumbedeutsam sind und überörtliche Bedeutung haben. Die abschließende Entscheidung, ob ein Raumordnungsverfahren durchgeführt wird und seine Durchführung selbst obliegen den Ländern. Aufgabe

⁶³ Beispielsweise wurde im betreffenden Landesentwicklungsplan Hessens der Ausbau des Flughafens Frankfurt/Main an die Einführung eines Nachtflugverbotes geknüpft (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, 2007)

des Verfahrens ist es, die Raumverträglichkeit eines Flughafens am beantragten Standort zu prüfen, d. h. die Vereinbarkeit mit den Festlegungen in den Raumordnungsplänen.

Ergänzend werden im Raumordnungsverfahren auch Standortalternativen geprüft, sofern in den Raumordnungsplänen mehrere mögliche Standorte dargestellt wurden oder sich im Verlauf des Planungsprozesses ernsthaft in Betracht kommende Standortalternativen ergeben. Zudem wird eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchgeführt. Das Ergebnis des Raumordnungsverfahrens ist in dem nachfolgenden Zulassungsverfahren zu berücksichtigen.

Planfeststellung

Die Entscheidung über die Zulassung oder Erweiterung eines Flughafens wird im Planfeststellungsbeschluss getroffen. Auch für dieses Verfahren sind die Länder zuständig. Der Planfeststellungsbeschluss hat alle öffentlichen und privaten Belange wie Umweltschutz, Landwirtschaft oder auch privates Eigentum abzuwägen und zu berücksichtigen. Dabei sind die Ziele der Raumordnung zu beachten sowie die Grundsätze und sonstige Erfordernisse der Raumordnung sowie ggf. die Ergebnisse des vorgelagerten Raumordnungsverfahrens zu berücksichtigen.

Vor der Entscheidung über die Zulassung eines Flughafens sind die Umweltauswirkungen des Vorhabens in einer UVP zu prüfen. Ein vorlaufendes Raumordnungsverfahren ist dabei zu berücksichtigen. Die UVP muss sich räumlich auf den gesamten Einwirkungsbereich des Flughafens erstrecken, in dem abwägungserhebliche Auswirkungen des Vorhabens möglich sind, und darf sich daher nicht nur auf die Betrachtung bestimmter Flugrouten beschränken. Es sind also alle Bereiche zu berücksichtigen, in denen An- und Abflugverkehr weder aus tatsächlichen noch aus rechtlichen Gründen ausgeschlossen werden kann. Diese in der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts aufgestellten Grundsätze für die Prüfung der Umweltverträglichkeit von Flugrouten⁶⁴ wurden im Juni 2016 in § 8 Abs. 1 Satz 4 f. LuftVG klargestellt. Regelungen zur Ausweisung der von An- und Abflügen zu verschonenden Gebiete und zur Festlegung von Bedingungen für die Zulässigkeit von Überflügen über bestimmten Gebieten ergänzen diese Vorschrift. Hiermit hat der Bundesgesetzgeber unter anderem auf die Kritik des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) am seinerzeitigen Status quo reagiert (Faulstich et al., 2014).

Festlegung der Flugrouten

Die Festlegung von Flugrouten erfolgt weder auf der Ebene der Raumordnung noch im Planfeststellungsbeschluss. Bei der Flugroutenfestlegung sind jedoch die Ergebnisse dieser Verfahren zu beachten. Für die Ermittlung der Geräuschbelastung in der Flughafenumgebung im Rahmen der Planfeststellung werden vereinfachte Flugroutenverläufe verwendet. Die detaillierte Bewertung eines konkreten Vorhabens kann in dieser Detailschärfe und mit technisch belastbaren Flugroutenprognosen erst später erfolgen.

Die Festlegung der Flugrouten erfolgt durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) in einem dem Planfeststellungsverfahren nachgelagerten Verfahren (Abschnitt 5.3.2). Der SRU führt hierzu aus: „Das bedeutet, dass die für die Flughafenplanung zuständigen Landesbehörden im Grundsatz keine verbindlichen Vorgaben darüber machen können, wie die An- und Abflugrouten später einmal ausgestaltet werden sollen. Umgekehrt muss das BAF bei seiner Entscheidung über die Flugrouten die in der Zulassungsentscheidung getroffenen Vorgaben hinsichtlich der Anlage, der Kapazität und der Betriebszeiten etc. umsetzen...“ (Faulstich et al., 2014).

Konzepte des Bundes zum Luftverkehr

Dem Bund obliegt grundsätzlich die Gesetzgebungskompetenz über den Luftverkehr, er hat jedoch die Genehmigung von Flugplätzen den Ländern als Auftragsverwaltung übertragen. Dem

⁶⁴ BVerwG, Urteil vom 31.07.2012, Rn. 44, NVwZ 2013, 297,302

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) bleibt aber eine Weisungskompetenz nach Art. 85 Abs. 3 S. 1 GG, mit der dieses bei Flugplatzgenehmigungen bzw. diesbezüglicher Änderungen von Bundesrelevanz auf die Länder einwirken kann (Schütte et al., 2014). Nach § 17 Absatz 2 Satz 1 ROG⁶⁵ kann der Bund zudem die „verkehrliche Anbindung“ der Flughäfen mit der von ihm verantworteten Verkehrsinfrastruktur (Bundesfernstraßen, Schienennetz des Bundes und Bundeswasserstraßen) planerisch gestalten.

Die Bundesregierung hat 2009 ein Flughafenkonzept entwickelt (Bundesministerium für Verkehr, 2009), das eine Analyse der gegenwärtigen und zu erwartenden künftigen Flughafenstruktur sowie Aussagen zur planerischen Steuerung des Luftverkehrs enthält. Im Grundsatz beschreibt es die politischen Zielvorstellungen der Bundesregierung. Das Luftverkehrskonzept des BMVI aus dem Jahr 2017 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017) benennt zwar die Flughäfen mit Bundesinteresse und betont, dass deren Leistungsfähigkeit erhalten bleiben soll, es enthält aber keine konkreten Aktivitäten, um dies umzusetzen. Da die grundsätzliche Entscheidung über den Standort eines Flughafens in der Zuständigkeit der Länder liegt (s. o.) sind die Länder formal nicht an die Flughafen- oder Luftverkehrskonzepte des Bundes gebunden (Faulstich et al., 2014).

5.2.1.2 Handlungsempfehlungen

Ausschöpfen der Möglichkeiten des Bundes bei der Steuerung eines deutschlandweiten Flughafenetzes

Der Bund sollte die ihm bereits zur Verfügung stehenden Steuerungsmöglichkeiten bei der Weiterentwicklung des Flughafenetzes nutzen. So sollte er auf der Grundlage einer ökologischen Bedarfsplanung ein Standortkonzept für Flughäfen gem. § 17 ROG erstellen. Entsprechend sollten im Bundesverkehrswegeplan für eine verkehrliche Anbindung nur solche Flughäfen berücksichtigt werden, die der Bund in seinem Standortkonzept positiv bewertet hat. Ebenso sollte er auch nur in solche Flughäfen investieren. Im Einzelnen sollten folgende Schritte unternommen werden:

► **Standortkonzept**

Der Bund erstellt nach § 17 Abs. 2 Satz 1 ROG ein Standortkonzept für Flughäfen, das unter Umweltschutzaspekten optimiert ist. Dieses basiert – neben sozialen und ökonomischen Kriterien – auf einer an ökologischen Kriterien ausgerichteten Bedarfsplanung. Neben vorhandenen Forschungsergebnissen (Köck et al., 2017) besteht hierzu weiterer Forschungsbedarf zur Bestimmung der Kriterien und der rechtlichen Einbindung der Bedarfsplanung.

► **Verknüpfung mit dem Bundesverkehrswegeplan**

Auf Basis des Standortkonzepts legt der Bund fest, welche Flughäfen durch Bundesverkehrswege erschlossen werden sollen und welche nicht. Diese Festlegung fließt in den Bundesverkehrswegeplan ein. Die rechtliche Grundlage für diese Maßnahme ist mit § 17 ROG bereits vorhanden. Der Vorrang bei der verkehrlichen Anbindung ist auf die Schiene zu legen.

► **Investitionsplanung**

Investitionen und Fördermittel des Bundes oder mit Bundesbeteiligung (z. B. als Gesellschafter oder im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur“, GRW) sollten nur in Projekte fließen, deren Bedarf festgestellt und im Standortkonzept positiv bewertet wurde.

Für das Erreichen eines umweltverträglichen Luftverkehrs ist ein Verständnis der „öffentlichen Interessen des Bundes“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017) erforder-

⁶⁵ Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986).

derlich, das über die öffentlichen Verkehrsinteressen hinaus auf die Gemeinwohlaspekte des Umwelt- und Gesundheitsschutzes ausgeweitet wird. Eine strategische Planung des Flughafennetzes des Bundes sollte daher auch die Umwelt- und Sozialverträglichkeit, wie z. B. Fluglärm und Erreichbarkeit berücksichtigen. Es sollte die Standorte und ihre Eigenschaften mit den verschiedenen Bedarfen und Belangen abwägen (Umweltfragen, 2017) und auf einen Bedarf ausgerichtet werden, der auch unter Berücksichtigung ökologischer Kriterien festgestellt wird (Köck et al., 2017). Dadurch könnte eine Konzentration auf vorwiegend solche Flughäfen erfolgen, die unter Berücksichtigung ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Kriterien von hohem Bundesinteresse sind. Den Flughäfen könnten Schwerpunktfunktionen und Spezialisierungen nach Umwelt- und Wirtschaftlichkeitskriterien zugewiesen werden, z. B. auch die Konzentration spezieller Luftfrachtverkehre (Abschnitt 5.2.2.4). Durch eine klare Aufgabenverteilung innerhalb einer arbeitsteiligen Struktur können dann letztlich weniger frequentierte und/oder aus ökologischer Sicht problematische Standorte entfallen. Die im Rahmen einer Positivliste aufgeführten Flughäfen sind zu erhalten oder können – in wenigen begründeten Fällen – ausgebaut werden. Aus Sicht des sparsamen und schonenden Umgangs mit Flächen sollte ein weiterer Ausbau jedoch möglichst vermieden werden. Die übrigen Standorte sind im Hinblick auf ihre Auslastung und ihre Umweltwirkungen nach entsprechender Prüfung einer Negativliste aufzuführen. Eine zeitnahe Schließung sowie Möglichkeiten der Nachnutzung sind in Abhängigkeit von ihrer Nähe zu Siedlungsstandorten zu prüfen. Zudem sind verkehrsträgerübergreifende Kooperationen auszubauen und zu optimieren. Anknüpfend an den Bundesverkehrswegeplan sind weiterhin Aussagen zur Rolle des Luftverkehrs im Rahmen von Gesamtverkehrszielen zu entwickeln.

Weiterer Forschungsbedarf besteht neben den Kriterien für eine ökologisch ausgerichtete Bedarfsplanung in der Bestimmung ihres Verhältnisses untereinander und ihrer Gewichtung sowie in der rechtlichen Einbindung der Ergebnisse der Bedarfsplanung in die Planungs- und Zulassungskaskade für Flughäfen. Weitere Gestaltungsräume des Bundes bei der Planung des Flughafennetzes sind rechtlich zu prüfen.

Flugroutenplanung

Das Verfahren zur Festlegung von Flugrouten ist zu verbessern. Insbesondere ist es in der Vergangenheit im Hinblick auf Geräuschbelastungen und mögliche weitere Umweltauswirkungen zu erheblichen Fehleinschätzungen bei der Planung von Flughäfen gekommen, wenn Flugkorridore angenommen wurden, die nicht mit den künftigen Flugrouten übereinstimmten. Daraufhin erfolgte im Juni 2016 eine Klarstellung in § 8 Abs. 1 Satz 4 f. LuftVG, die dafür sorgen soll, dass künftig bei der Planfeststellung alle realistisch in Betracht kommenden Korridore mit ihren Auswirkungen untersucht werden (s.o.). Das UBA empfiehlt, diese Klarstellung nach einem Zeitraum von bis zu sechs Jahren auf ihre Praxisrelevanz und ihren Nutzen im Hinblick auf eine wirksame Umweltvorsorge zu evaluieren. Dabei sollte unter anderem überprüft werden, ob es aufgrund der Neuregelung gelingt, „die Umweltauswirkungen aller möglichen Flugrouten hinreichend zu untersuchen und den Anwohnern eine Möglichkeit zu bieten, sich effektiv an dem Verfahren zu beteiligen“ (Faulstich et al., 2014).

Öffentlichkeitsbeteiligung

Bei Entscheidungen über den Bau bzw. Aus-, Um- oder Rückbau der nationalen Flughafeninfrastruktur und bei der Festlegung von Flugverfahren ist die frühzeitige und wirksame Einbeziehung der Öffentlichkeit essentiell. Informelle Beteiligungsmöglichkeiten, über die Bürgerinnen und Bürger frühzeitig informiert und in die Planungen eingebunden werden (z. B. Diskussionsforen), sollten daher die in Deutschland gesetzlich vorgeschriebenen Beteiligungsverfahren ergänzen. Eine gute Prozessgestaltung, größtmögliche Verfahrenstransparenz sowie Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit der umweltbezogenen Unterlagen für die Öffentlichkeit sind dabei unverzichtbar, um die Hürden für eine Beteiligung niedrig zu halten. Eine umfassende Partizipation

sollte Betroffenen die Möglichkeit zu einer frühzeitigen Stellungnahme bei Bauvorhaben und geplanten Flugverfahrensänderungen einräumen und auch die Anliegen von Anwohnerinitiativen zur Minderung des Fluglärms transparent abwägen.

5.2.2 Ökonomische Anreize

Der Luftverkehr wird durch zahlreiche umweltschädliche Subventionen privilegiert, insbesondere durch die Befreiung des Kerosins von der Energiesteuer und die Mehrwertsteuerbefreiung von internationalen gewerblichen Flügen. Darüber hinaus werden die gesellschaftlichen Kosten des Luftverkehrs, die durch Lärm, Treibhausgase und andere Umweltbelastungen entstehen und z. B. in Form von Gesundheitsbeeinträchtigungen oder Immobilienwertverlusten auftreten, nur zu einem Bruchteil nach dem Verursacherprinzip den Emittenten angelastet. Dies widerspricht der Schaffung von Kostengerechtigkeit zwischen den Verkehrsträgern und ist ein wichtiger Faktor für das starke Wachstum des Luftverkehrs in den vergangenen Jahrzehnten. Hinzu kommt, dass durch die Subventionierung und die mangelnde Internalisierung der Umweltkosten viel zu geringe ökonomische Anreize bestehen, den Luftverkehr umweltverträglicher zu gestalten (Köder und Burger, 2016).

5.2.2.1 Abbau von Subventionen über eine Weiterentwicklung der Besteuerung

Im Gegensatz zu den von Kraftfahrzeugen und der Bahn verwendeten Kraftstoffen ist das im gewerblichen Luftverkehr eingesetzte Kerosin in Deutschland von der Energiesteuer befreit. Dies widerspricht dem Prinzip der steuerlichen Gleichbehandlung und führt zu Wettbewerbsverzerrungen zwischen den Verkehrsträgern, sodass klimafreundlichere Verkehrsträger wie die Bahn benachteiligt werden.

Grundsätzlich wäre Kerosin nach dem im deutschen Energiesteuergesetz dafür vorgesehenen Steuersatz in Höhe von 65,45 Cent/l zu besteuern⁶⁶. Laut Subventionsbericht der Bundesregierung führte die Steuerbefreiung des Kerosins im Jahr 2018 zu Steuermindereinnahmen im Umfang von rund 570 Mio Euro (Bundesministerium der Finanzen, 2017). Berücksichtigt ist hierbei jedoch nur der Treibstoffverbrauch für den inländischen Luftverkehr, da in Ermangelung fehlender Abkommen mit anderen Mitgliedstaaten derzeit nur dieser besteuert werden darf. Ökonomisch betrachtet stellt jedoch auch die Energiesteuerbefreiung von Kerosin, das bei Flügen zu ausländischen Zielen verwendet wird, eine Subvention dar. Daher ist es sinnvoll, bei der Berechnung des Subventionsvolumens das gesamte, im Inland abgesetzte Kerosin für den gewerblichen Luftverkehr zugrunde zu legen. Insgesamt verursacht die Befreiung des Luftverkehrs von der Energiesteuer bei einem Inlandsabsatz von 9,9 Mio. Tonnen Kerosin⁶⁷ für die zivile Luftfahrt im Jahr 2017 einen Steuerausfall von rund 8,1 Mrd. Euro.

Wie in Abschnitt 5.1.2.4 dargelegt, strebt das UBA eine möglichst weiträumige – EU-weite – Kerosinsteuer auf das für Flüge zwischen den mitmachenden Staaten abgesetzte Kerosin in Ergänzung zu einem deutlich lenkungswirksameren EU-ETS an. Da die Einführung einer EU-weiten Steuerlösung aus heutiger Perspektive unsicher erscheint, empfiehlt das UBA zunächst die zeitnahe Einführung einer nationalen Kerosinsteuer für inländische Flüge, in erstem Schritt zunächst mit dem Mindeststeuersatz der EG-Energiesteuerrichtlinie von 33,0 Cent/l. Dadurch werden bilaterale Abkommen mit anderen EU-Mitgliedstaaten erleichtert, die den Kern einer künftigen EU-weiten Steuerlösung bilden können.

⁶⁶ EnergieStG § 2, Abs. 1, Nr. 3. Der Steuersatz setzt sich aus 50,11 Cent/l Verbrauchsteueranteil und 15,34 Cent/l Ökosteuerteil zusammen.

⁶⁷ Berechnung Umweltbundesamt auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamt: Fachserie 8 Reihe 6.2 (2018) und Umsatzstatistik 2017 (2019)

Mehrwertsteuer auf internationale Flüge

Der grenzüberschreitende gewerbliche Luftverkehr ist in Deutschland von der Mehrwertsteuer befreit, nur inländische Flüge sind mehrwertsteuerpflichtig. Diese Steuerbefreiung begünstigt den Luftverkehr gegenüber anderen Verkehrsträgern und ist daher abzubauen. Aus Umweltschutzsicht ist dies ebenfalls dringend erforderlich, da es sich bei dem Flugzeug um das klimaschädlichste Verkehrsmittel handelt. Die Subventionierung des Luftverkehrs durch die Mehrwertsteuerbefreiung betrug im Jahr 2017 ca. 4,2 Mrd. Euro⁶⁸.

Wie in Abschnitt 5.1.2.4 dargelegt, strebt das UBA für die Mehrwertsteuerbefreiung des internationalen Luftverkehrs eine EU-weite Lösung an, hält diese aber kurz- bis mittelfristig für unrealistisch.

Luftverkehrsteuer

Ein erster Schritt zur Besteuerung des Luftverkehrs und damit zur Angleichung der Wettbewerbsbedingungen zwischen den Verkehrsträgern war die Einführung des Luftverkehrsteuergesetzes (LuftVStG) zum 01.01.2011. Differenziert nach Streckenlänge wurde 2014 pro Ticket eine Steuer von 7,50 Euro, 23,43 Euro oder 42,18 Euro erhoben. Die Höhe der Luftverkehrsteuer ist an die Versteigerungserlöse des EU-Emissionshandels gekoppelt. Die Sätze werden jährlich neu festgelegt, sodass der Beitrag des Luftverkehrs zur Haushaltskonsolidierung 1 Mrd. Euro beträgt. Aktuell liegen die Sätze bei: 7,38 Euro, 23,05 Euro und 41,49 Euro.

Die steuerlichen Subventionen des Luftverkehrs im Bereich der Kerosin- und der Mehrwertsteuer beliefen sich im Jahr 2012 auf etwa 12,3 Mrd. Euro. Das Aufkommen der Luftverkehrsteuer betrug hingegen nur rund 1 Mrd. Euro. Die Luftverkehrsteuer müsste also theoretisch im Durchschnitt um den Faktor 12,3 erhöht werden, um die steuerlichen Subventionen abzubauen. Dies veranschaulicht, dass das LuftVStG bisher nur einen geringen Beitrag zur Verringerung der steuerlichen Begünstigung des Luftverkehrs leistet.

Die Luftverkehrsteuer dient primär der staatlichen Einkommenserzielung, soll aber gemäß Koalitionsvertrag auch eine ökologische Steuerungswirkung entfalten. Da die Luftverkehrsteuer das Fliegen verteuert, kann sie die Nachfrage nach Flugreisen senken und dadurch die Umwelt entlasten. Allerdings lassen sich die ökologischen Lenkungswirkungen durch eine Reform der Luftverkehrsteuer verbessern. Der Lenkungswirkung steht allerdings ein Risiko von Ausweichverkehren (sogenanntes „Carbon Leakage“) über grenznahe Flughäfen gegenüber. Während dies im innerdeutschen Kontext und dem europäischen Kurzstreckenverkehr keine nennenswerte Rolle spielen dürfte, steigt das Risiko mit der Flugdistanz, weil hier die zusätzliche Transferdauer zum Ausweichflughafen weniger ins Gewicht fällt.

Für eine erhöhte Lenkungswirkung, die gleichzeitig das Risiko von Ausweichverkehren berücksichtigt, gibt es verschiedene Ansatzpunkte: Die Luftverkehrsteuer wird bisher je Passagier erhoben. Leere Plätze werden nicht berücksichtigt. Dass ein leeres Flugzeug nicht umweltschonender als ein gut ausgelastetes Flugzeug ist, sollte sich aber auch im LuftVStG widerspiegeln. Anstelle einer Ticket-bezogenen Steuer wäre daher eine Flugzeug-bezogene Steuer denkbar, die unabhängig von der Auslastung erhoben wird. Bei einer Flugzeug-bezogenen Steuer würde allerdings nur der Flug bis zur ersten ausländischen Zwischenlandung erfasst werden. Die Ticket-bezogene Luftverkehrsteuer hingegen schließt mit ihren Entfernungsklassen den gesamten Reiseverlauf ein. Dies spricht dafür, an der Ticket-bezogenen Steuer festzuhalten. Allerdings sollte die Ticketsteuer nach Umweltschutzkriterien der eingesetzten Flugzeuge gestaffelt werden, denn dadurch erhalten die Fluggesellschaften einen ökonomischen Anreiz, Flugzeuge mit geringeren spezifischen Emis-

⁶⁸ Berechnung Umweltbundesamt auf Basis der amtlichen Mineralöl-daten des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), der Energiebilanzen der BR Deutschland der AG Energiebilanzen (AGEB) und gemäß Berechnungen in TREMOD AV (TRE-MOD Aviation; ifeu Heidelberg & Ökoinstitut Berlin, 2018).

sionen einzusetzen und anzuschaffen. Im Mittelpunkt sollte die Differenzierung entsprechend der spezifischen Treibhausgasemissionen des Flugzeugs stehen. Zusätzlich könnte jedoch auch eine Staffelung nach den Lärm- und Schadstoffemissionen erfolgen. Darüber hinaus sollten Frachtgüter im Rahmen der Luftverkehrsteuer ebenfalls besteuert werden.

Um die Lenkungswirkung der Luftverkehrsteuer zu erhöhen, sollte die Einnahmedeckelung aus Luftverkehrsabgabe und Emissionshandel auf eine Mrd. Euro abgeschafft und die Besteuerung schrittweise deutlich erhöht werden. Orientierungsrahmen dieser Neujustierung ist für das Umweltbundesamt die schrittweise Angleichung der fiskalischen Sockelbelastung mit anderen Verkehrsträgern. Eine volle Angleichung sollte bis spätestens 2030 sichergestellt sein. Vor diesem Hintergrund wird die absehbar weiterbestehende Befreiung internationaler Flüge von der Mehrwertsteuer künftig durch eine sukzessive Erhöhung der Luftverkehrsteuer kompensiert, während parallel ein schrittweiser Einstieg in die Kerosinbesteuerung Ungleichgewichte im Bereich der Energiebesteuerung abbaut. Die Subventionierung des Luftverkehrs durch die Mehrwertsteuerbefreiung belief sich im Jahr 2017 auf ca. 4,2 Mrd. Euro. In einem ersten, kurzfristig umzusetzenden Anpassungsschritt sollte das Aufkommen der Luftverkehrsteuer durch Neujustierung der Tarifstruktur zunächst mindestens verdoppelt werden.

Die Mehreinnahmen sollten anteilig in einen neu zu schaffenden „Innovations- und Demonstrationfonds Luftverkehr“ fließen (Abschnitt 5.2.2.2). Bei der Reform der Luftverkehrssteuer wäre ein koordiniertes Vorgehen mit den Nachbarländern sinnvoll, um Ausweichreaktionen zu verringern. Wie bei der Einführung einer Kerosinsteuer ist eine europäische Lösung aber schwieriger zu realisieren als eine zunächst nationale Lösung. In einem ersten Schritt sollte daher insbesondere der Steuersatz für Kurzstreckenflüge angehoben werden, da hier selbst bei einem nationalen Alleingang kein signifikantes Risiko von Ausweichverhalten besteht. Damit kann die Ticketsteuer gemeinsam mit einem gestärkten EU-ETS und einer Kerosinsteuer wichtige Impulse für die Verlagerung des innerdeutschen Luftverkehrs auf die Schiene setzen.

5.2.2.2 Schaffung eines nationalen Innovations- und Demonstrationfonds Luftverkehr

Durch die Stärkung des EU-Emissionshandels und eine zunehmende Besteuerung des Luftverkehrs über eine Kerosin- und Ticketsteuer ergeben sich auf Bundesebene zusätzliche finanzielle Spielräume. Auch wenn eine direkte Zweckbindung steuerlicher Mehreinnahmen haushaltsrechtlich nicht möglich ist, sollten diese Spielräume anteilig dazu genutzt werden, den Umbau des Luftverkehrssektors hin zu mehr Nachhaltigkeit zu unterstützen. In Teilen sollten diese Einnahmen auch der Bevölkerung zurückgegeben werden, wodurch Personen profitieren, die verhältnismäßig wenig und kürzere Distanzen fliegen. Im Rahmen eines neu zu schaffenden „Innovations- und Demonstrationfonds Luftverkehr“ könnten u. a. Investitionen für Flottenmodernisierungsprogramme, zur Entwicklung neuer umwelt- und klimafreundlicherer Flugzeuge und Flugverfahren (auch zum Lärmschutz), vor allem aber die Markteinführung nachhaltiger alternativer, postfossiler Treibstoffe gefördert werden (z. B. Aufbau von Pilot- und Demonstrationsanlagen zur PtL-Produktion, großtechnische Erprobung von Komponenten, Forschung zur Steigerung der energetischen Effizienz in der PtL-Herstellung, Abschnitt 5.1.3). Ein solcher Fonds könnte in Deutschland in Anlehnung an einen bereits bestehenden europäischen Innovationsfonds im Rahmen des EU-Emissionshandels ausgestaltet werden. In diesem werden Demonstrationsprojekte für erneuerbare Energien, CCS⁶⁹, die Industrie (inkl. CCU⁷⁰) und Speichertechnologien gefördert.

Für die Projektauswahl bieten sich einzelne, technologie- bzw. anwendungsbezogene Ausschreibungsrunden an. Dabei sollte es insbesondere möglich sein, nicht nur auf die Vermeidungskosten pro Tonne CO₂ abzustellen. Denn ein solch enger Fokus birgt die Gefahr, marktnähere bzw. grö-

⁶⁹ CCS (englisch: carbon dioxide capture and storage): CO₂-Abscheidung und -Speicherung

⁷⁰ CCU (englisch: carbon dioxide utilization): CO₂-Abscheidung und Verwendung

ßere Projekte gegenüber innovativeren Projekten zu bevorzugen, die jedoch nicht automatisch die größten langfristigen Beiträge zur Dekarbonisierung aufweisen. Daher könnten zusätzlich der Umfang der relativen Emissionsminderung und der Innovationsgrad im Vergleich zu Techniken des Status Quo sowie die voraussichtliche Übertragbarkeit auf andere Firmen und ggf. andere Sektoren sowie das Potenzial für künftige Kostensenkungen bei der Projektauswahl berücksichtigt werden.

Analog zum EU-Innovationsfonds könnten sowohl Kapital- als auch operative Mehrkosten im Vergleich zu Techniken des Status Quo gefördert werden. Zudem erscheint es zweckmäßig, dass die Projekte verschiedene Reifegrade zwischen Beginn der Demonstrationsphase und der Markteinführung aufweisen können. Die Zuschüsse sollten den Risikograd der geförderten Projekte berücksichtigen. Für bereits relativ marktnahe Projekte mit vergleichsweise geringerem betriebswirtschaftlichem Risiko können auch andere marktgängige Instrumente wie Kredite oder Bürgschaften vergeben werden. Es erscheint sinnvoll, dass die Zuschüsse aus dem Innovations- und Demonstrationsfonds Luftverkehr grundsätzlich mit anderen nationalen oder EU-Förderprogrammen (z. B. HORIZON) kombiniert werden können.

Darüber hinaus sollte der Innovationsfond auch explizit Gelder für Suffizienzmaßnahmen zur Verfügung stellen und soziale Innovation in der Erprobung unterstützen und in der Durchsetzung fördern. Dies können Maßnahmen sein wie betriebliches oder behördliches Mobilitätsmanagement, mobiles Arbeiten, Kommunikationskampagnen zu Alternativen zum Fliegen oder Aufbau und Unterstützung von Austauschplattformen zum Thema „weniger Fliegen“.

5.2.2.3 Lärm- und schadstoffabhängige Start- und Landeentgelte

Üblicherweise erheben Flughafenunternehmer von den Fluggesellschaften Entgelte für den Betrieb der Luftfahrzeuge auf dem Flughafen und die Benutzung der Passagiereinrichtungen. Die Flughafenentgelte umfassen verschiedene Komponenten, zu denen auch Entgelte gehören, die von der Geräusch- und teilweise auch der Schadstoffemission des Luftfahrzeuges abhängen. Die Flughafenentgelte werden auf Basis privatrechtlicher Verträge erhoben und sind an verschiedene nationale und internationale rechtliche Rahmenbedingungen gebunden. Sie bedürfen nach § 19b LuftVG der Genehmigung durch die zuständige Landesluftfahrtbehörde.

Lärmabhängige Start- und Landeentgelte

Lärmabhängige Start- und Landeentgelte (SLE) werden an deutschen Flughäfen mit unterschiedlicher Ausprägung und Wirksamkeit teilweise seit Jahrzehnten erhoben. Nach den Vorgaben der ICAO müssen diese vor allem diskriminierungsfrei und aufkommensneutral ausgestaltet sein. Ein gewisser Betrag an Mehreinnahmen durch diese SLE-Komponente darf jedoch erzielt werden, wenn der Flughafenunternehmer diese für Lärminderungs- und Vermeidungsmaßnahmen verwendet (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2009). Insbesondere können die Einnahmen zur Finanzierung von baulichen Lärmschutzmaßnahmen genutzt werden. Lärmabhängige SLE sollen gemäß der ICAO nur eingesetzt werden, wenn sie zur Minderung des Fluglärms erforderlich und geeignet sind. Sie müssen daher zwangsläufig eine erhebliche Anreizwirkung für umweltmotivierte Lenkungs- und Verlagerungseffekte aufweisen.

Neben der indirekten Förderung von Flottenerneuerungen an dem jeweiligen Flughafen sollten auch Nachrüstungen von Lärminderungsmaßnahmen an bestehenden Flugzeugen belohnt werden. Grundsätzlich wäre hierzu auch die direkte Bezuschussung einer Flottenum- bzw. -nachrüstung denkbar. Davon würden aber Fluggesellschaften am meisten profitieren, die eine besonders alte und damit zumeist laute Flotte besitzen. Um aber die Fluggesellschaften zu belohnen, die jüngere und damit zumeist leisere Flugzeuge einsetzen, wäre das Instrument der SLE zu bevorzugen.

Die Ausgestaltungsformen der SLE unterscheiden sich teils erheblich an den einzelnen Flughäfen. Fast alle größeren Flughäfen erheben SLE in Abhängigkeit eines vor Ort gemessenen (gemittelten) Schallpegels. Hierbei werden die bei einem Überflug erzeugten Immissionspegel gemessen, gemittelt und einer bestimmten Lärmkategorie zugeordnet. Die verschiedenen Lärmkategorien sind mit unterschiedlich hohen Aufschlägen auf die SLE belegt. Zusätzlich wird darüber hinaus zumeist berücksichtigt, zu welchem Zeitpunkt die Flugbewegung stattfindet: Starts und Landungen sind nachts deutlich teurer als tagsüber.

An kleineren Flughäfen und Landeplätzen werden Entgelte oftmals auf der Grundlage der weniger differenzierten ICAO-Lärmklassen erhoben. Die Entgelte richten sich dann nicht nach den vor Ort gemessenen (gemittelten) Immissionspegeln, sondern nach den Pegeln, die bei der Luftfahrzeugzulassung ermittelt wurden und der daraus abgeleiteten Lärmkategorien (Abschnitt 5.1.1.1) – teilweise noch nach der sogenannten Bonusliste des Bundesverkehrsministeriums.

Eines der fortschrittlicheren SLE-Systeme in Deutschland, mit etwas besserer Lenkungswirkung als einfachere Systeme, existiert am Flughafen Frankfurt/Main. Es ist insbesondere durch folgende Komponenten charakterisiert (Fraport AG - Frankfurt Airport Services Worldwide, 2018a):

- ▶ 15 Lärmklassen (in 1-dB(A)-Schritten),
- ▶ basierend auf durchschnittlichen Geräuschpegeln der Luftfahrzeuge pro Start oder Landung, die mit lokalen Fluglärmmessanlagen ermittelt wurden,
- ▶ Differenzierung nach Tag, Nachtrandstunden oder Kernnacht (je Start oder Landung),
- ▶ exponentielle Spreizung der Tarife
- ▶ Anreize für Lärminderungsmaßnahmen, wie z. B. das Nachrüsten von Flugzeugen mit Wirbelgeneratoren oder die Nutzung des modernen Anflugsystems GBAS (Ground-Based Augmentation System).

Ein Potential besteht somit in der Verbesserung der existierenden SLE-Systeme nach dem Vorbild des Flughafens Frankfurt/Main. Aber selbst dann stellen diese Entgelte nur einen relativ geringen Anteil der Kosten eines Fluges dar, sodass deren Lenkungswirkung als gering einzuschätzen ist (Hochfeld et al., 2004). Darum sollten diese weiterentwickelt werden, insbesondere nach dem Prinzip der verursachergerechten Anlastung der Umweltkosten eines Fluges (siehe unten).

Ein weiteres Problem bei SLE-Systemen besteht darin, dass die Abrechnungssystematik aufgrund der Mittelung der Beurteilungspegel über eine längere Zeitperiode relativ träge ist. Lärminderungsmaßnahmen einer Fluggesellschaft spiegeln sich in der Regel kaum in vermindertem Entgelt wieder, da der entsprechende Luftfahrzeugtyp einer Lärmkategorie zugeordnet wird, die sich aus dem gemittelten Pegelwerten aller Bewegungen – je nach Beurteilungsgrundlage Start und/oder Landung – sämtlicher Fluggesellschaften ergibt. Es besteht somit ein begrenzter Anreiz für eine einzelne Fluggesellschaft besonders lärmmindernde Flugverfahren anzuwenden, wenn sich dies aufgrund der Mittelung nicht in der Lärmkategorie widerspiegelt. Eine Einzelabrechnung anhand tatsächlich verursachter Lärmpegel könnte ein verbessertes Reaktionsverhalten der Fluggesellschaften bewirken. Eine derartige Weiterentwicklung der Entgeltsystematik wird derzeit an den Berliner Flughäfen diskutiert (Johannsen, 2018).

Schadstoffabhängige Start- und Landeentgelte

An mehreren deutschen Flughäfen wird zusätzlich zum lärmabhängigen SLE auch ein schadstoffabhängiges SLE erhoben. Dieses Entgelt ist für die NOx- und HC-Emissionen pro Triebwerk des Luftfahrzeuges zu entrichten und basiert auf dem Start/Landezyklus der ICAO (LTO-Zyklus). Auch die schadstoffabhängigen SLE sollten anhand der durch Start oder Landung verursachten externen Umweltkosten bemessen werden.

Internalisierung der externen Kosten durch Start- und Landeentgelte

Das Instrument der SLE ist grundsätzlich geeignet, um die lokal wirksamen Umweltbeeinträchtigungen (v.a. durch Lärm und Luftschadstoffe) an einem Flugplatz finanziell zu regulieren. Dabei stellt sich die Frage nach der „richtigen Höhe“ der SLE. Ausgangspunkt sollten die externen Kosten sein, also in diesem speziellen Fall die Kosten, die der Allgemeinheit durch den Lärm oder den Luftschadstoffausstoß eines Fluges entstehen und nicht vom Verursacher getragen werden. Diese sind nicht nur von dem Luftfahrzeug abhängig – ein modernes Flugzeug emittiert in der Regel weniger Luftschadstoffe und Schall als ein vergleichbares älteres Modell – sondern z.B. auch vom gewählten Flugverfahren und dem Zeitpunkt des Fluges. Derselbe Flug verursacht nachts deutlich mehr Lärmbeeinträchtigungen als tagsüber. In älteren Studien wurden die Lärmkosten oftmals deutlich unterschätzt.

Die sachgerechte Höhe lärmabhängiger SLE ist pro Start oder Landung eines bestimmten Luftfahrzeug an einem bestimmten Flughafen unter Beachtung der aktuellen Erkenntnissen der Luftschadstoff- und Lärmwirkungsforschung (Abschnitt 3.4.2) zu ermitteln. In diesem Kontext wäre auch zu prüfen, inwiefern diese Entgelte in eine andere Form (z. B. eine Steuer) überführt werden könnten, was unter anderem den Konflikt mit der oben erwähnten Aufkommensneutralität löst, wenn die umzulegenden Lärmkosten die Ausgaben des Flughafens übersteigen (Lindmaier, 2011).

Ein weiterer Grund für die systematische Unterschätzung der externen Lärmkosten liegt in dem, in diesbezüglichen Studien oftmals verwendeten Grenzkostenansatz. Bei Anwendung der aktuell gebräuchlichen Expositions-Wirkungskurven mit moderaten linearen Steigungen sollte für Lärmtarife besser der Durchschnittskostenansatz herangezogen werden. Für die Luftschadstoff-abhängigen Tarife wäre hingegen der höhere Grenzkostenansatz zweckmäßig. Die externen Umweltkosten pro Start oder Landung eines bestimmten Luftfahrzeug an einem bestimmten Flughafen wäre dann anhand einer Modellierung der in diesem Fall betroffenen Personen und einer Bewertung dieser Belastungen vorzunehmen.

5.2.2.4 Logistik und Wettbewerb

Der klimaschädliche Luftfrachtverkehr kann insbesondere im interkontinentalen Transport bisher nicht vollständig über den umweltverträglicheren See- und Bahnverkehr abgewickelt werden. Komplexe Fertigungsprozesse und Wertschöpfungsketten mit globaler Reichweite erfordern fallweise sehr kurzfristige und zeitkritische Lieferungen von Vorleistungsprodukten, um einen reibungslosen Ablauf von Produktionsprozessen zu gewährleisten. Darüber hinaus hat – trotz tiefgreifender Digitalisierung der Arbeitsprozesse im Dienstleistungssektor – der Versand von Paket- und Expresssendungen nach wie vor eine sehr hohe Bedeutung, insbesondere im Bereich der Finanzdienstleistungen. Bisher ist nicht absehbar, dass die Versandmengen im Paket- und Expressbereich weniger stark als bisher ansteigen werden, gleichwohl dieser Markt Schwankungen unterliegt (Universal Postal Union (UPU), 2016).

Zwar sind die Transportmengen im Bereich der Luftfracht – gemessen an anderen Verkehrsträgern – sehr gering (Schubert et al., 2014), die Wertdichte und die Systemrelevanz in der Materialwirtschaft und in Teilen des Dienstleistungssektors sind jedoch hoch. Hier haben viele der nachfrageseitig wirksamen ökonomischen Maßnahmen (Abschnitt 5.1.2), das Potential, zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung beim Frachttransport beizutragen. Möglicherweise haben sie jedoch in verschiedenen Wirtschaftsbereichen im interkontinentalen Verkehr mittel- oder langfristig nicht die erforderliche Durchsetzungsfähigkeit. Neben technischen und technologischen Effizienzsteigerungen gibt es einige Ansätze, den Luftfrachtverkehr in einen ökologisch sinnvollen Entwicklungspfad einzubetten. Dies betrifft insbesondere drei Zielbereiche: die Weiterentwicklung der Flughafenetzwerke (Bereich Standorte), den Luftfrachtmarkt und eine optimale Nutzung der Systemvorteile der einzelnen Verkehrsträger (Kohärenz statt Konkurrenz). Auf diese

wird nachfolgend hinsichtlich der Herausforderungen und Bewältigungsstrategien näher eingegangen.

Standorte

Die räumliche Verteilung des Luftfrachtverkehrs in Deutschland wird vor allem durch die Fracht-Hubs) der großen Logistikunternehmen DHL am Flughafenstandort Leipzig/Halle und UPS am Flughafenstandort Köln/Bonn geprägt. Im „Luftverkehrskonzept des BMVI“ (Abschnitt 5.2.1) wird die Möglichkeit eines national koordinierten Hub-Netzwerks der Luftfracht nicht aufgegriffen. Eine möglicherweise sinnvolle Spezialisierung einzelner Luftfrachtstandorte (Post, Express, Volumengut, Vollfrachter, Gefahrgut etc.) kann daher nicht umgesetzt werden. Bei einer derartigen Spezialisierung könnten auch passgenaue Angebote alternativer Verkehrsträger im Zubringerverkehr entwickelt und umgesetzt werden.

Aufgrund der gewichtsbezogenen geringen Mengen an Gütern im Luftfrachtverkehr erscheint es sinnvoll und möglich, diese Luftfracht-Hubs zukünftig in gering verdichtete Räume zu verlagern, ohne ambitionierte Regelungen zum Umweltschutz, insbesondere mit Blick auf Nachtflüge, zu vernachlässigen. Damit sollte eine insgesamt geringere Geräuschbelastung erreicht werden, bei gleichbleibender Deckung der Nachfrage nach Luftfrachtverkehr und ohne weitere Standorte mit zusätzlichen Nachtflugbewegungen zu belasten. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass im bodengebundenen Verkehr keine zusätzlichen Belastungen durch Luftschadstoffe oder Treibhausgasemissionen entstehen (Abschnitt 5.2.1).

Markt

Die Geräuschbelastung im besonders sensiblen Nachtzeitraum wird vor allem durch Frachtflüge verursacht. Die bisher gesetzten ökologischen Rahmenbedingungen konnten ein Anwachsen dieses Verkehrs nicht verhindern. Dieses Verkehrsaufkommen war und ist bestimmt durch die Nachfrage durch (internationale) Besteller von Luftfracht und Logistikkonzepte in der Supply Chain. Diese Nachfrage sollte durch umweltgerechte Rahmenbedingungen inklusive der Internalisierung externer Kosten gedämpft und bewirkt werden, dass diese soweit wie möglich über den See- und Bahnverkehr abwickelt wird.

Ein erster Schritt ist die vollständige Bilanzierung der Treibhausgase aus den produktionsbedingten Transportvorgängen bis hin zur Auslieferung des Endproduktes. Dabei kann die DIN EN 16258 als Unterstützung einer einheitlichen und über Unternehmensgrenzen hinaus vergleichbaren Treibhausgas-Bilanzierung herangezogen werden. Mit Blick auf die globale Dimension der Luftfracht ist es sinnvoll, die DIN EN 16258 in eine internationale Normgebung (ISO) einzubetten bzw. weiterzuentwickeln. In einem zweiten Schritt können auf dieser Grundlage Optimierungspotenziale in den Transportketten identifiziert werden und es lassen sich zudem unternehmensinterne Ziele der Verbrauchsminderung festlegen, die einen erheblichen Einfluss auf die Nachfrage nach Luftfrachttransporten haben können. Im Idealfall werden konkrete Ziele und entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung von Luftfracht, z. B. durch Lagerhaltung oder die Nutzung von Frachtenbörsen, in umweltorientierten Logistikkonzepten auf Unternehmensebene festgehalten. Angebotsseitig könnte die Entwicklung einer entsprechenden Fördergebietskulisse zur Unterstützung der Bilanzierung und Zielsetzung erste Anreize für eine Optimierung der Nachfrage geben. Gleichzeitig müssen Handlungsoptionen wie die internationale Integration der Umweltkosten in das System des Luftfrachtverkehrs ausgeschöpft werden, um die Nachfrage nach Luftfracht zu steuern und wirkungsvolle Anreize zu schaffen, das System Luftfracht umweltschonend weiterzuentwickeln.

Verkehrssysteme / Funktionen

Der Luftfrachtverkehr ist gegenüber anderen Verkehrsträgern mit Blick auf die Lieferzeit bzw. Lead-Time oft konkurrenzlos. Bei weniger zeitsensiblen Transportfällen gilt dies im interkonti-

mentalen Verkehr auch für die Transportreichweiten gegenüber dem landgebundenen Verkehr, wengleich einige Langstrecken-Korridore für Güterbahnen ggf. eine marktfähige Alternative zur Luftfracht sein könnten, z. B. die „Neue Seidenstraße“ (Böll et al., 2018). Zudem grenzt sich das System der Luftfracht u. a. gegenüber touristischen Zielen im Personenluftverkehr dadurch ab, dass es oft keine alternative Zielwahl gibt, sofern keine räumlich näher liegenden Zulieferer existieren. Die Überlegenheit in bestimmten Teilmärkten des Güterverkehrs aus der Kombination von Reichweitenvorteil und Zeitersparnis kann im Wettbewerb der Verkehrsträger teils nur über die Nachfrage bzw. Auftraggeber von Luftfrachttransporten wirkungsvoll verändert werden. Dies greift jedoch tief in Produktionsabläufe, insbesondere der Lagerhaltung (Warehouse Management) ein.

Sowohl die Systemvorteile im Marktsegment der leichten, oft höherwertigen und zeitkritischen Transportfälle über lange Distanzen, als auch die oft alternativlose Zielwahl in globalen Produktionsprozessen und Dienstleistungen (Post, Paket, Express) schränkt den Handlungsspielraum im Umwelt- und Klimaschutz zunächst stark ein. Der Prozess um die Verabschiedung des CORSIA-Abkommens als einen ersten Schritt zeigt die eng gefassten Handlungsoptionen internationaler umweltpolitischer Verhandlungen deutlich auf. Die nationale Konzeptentwicklung beschränkt sich gegenwärtig auf ein Ressortkonzept des BMVI; ob dieses noch zu einem Luftverkehrskonzept der Bundesregierung weiterentwickelt wird, ist derzeit unklar. Ein solches ressortübergreifendes Luftverkehrskonzeptes, in dem verbindliche nationale Anstrengungen für eine ambitionierte Entwicklung einer internationalen Lösung zur umweltorientierten Bewältigung und v.a. Bepreisung des Luftverkehrs dargestellt werden, wäre aber auch für die Luftfracht eine wichtige Grundlage im Umwelt- und Klimaschutz.

Gleichzeitig ist die politische Steuerungsreichweite in Bezug auf Betriebsabläufe von Produktionsprozessen und ausgewählten Dienstleistungen gering. Hier konnte in der Vergangenheit die Unterstützung von Umwelt-Zertifizierungen (oft ohne konkreten Transportbezug) einen wichtigen Beitrag leisten. Dennoch kommen bei Transportfällen von hochwertigen und zeitsensiblen Gütern nach wie vor Luftfrachttransporte zum Einsatz. Tiefergreifende Zugriffe auf die Materialwirtschaft und industrielle Beschaffung erscheinen derzeit aus verschiedenen Gründen nicht möglich oder zielführend. Dennoch liegt gerade im Bereich der industriellen Beschaffung der zentrale Ausgangspunkt der Verkehrsentscheidung im Güterverkehr bzw. der Luftfracht. Möglich wäre langfristig daher eine politikfeldübergreifende Gestaltung von Wertschöpfungsketten, um die lokale Fertigungstiefe zu stärken und die Nachfrage nach Luftfracht von vornherein nicht entstehen zu lassen. Dabei können sowohl Kostenerhöhung im System der Luftfracht als auch eine Unterstützung tieferer Wertschöpfungsketten wesentliche Beiträge für einen umweltschonenden Luftverkehr leisten. Bisher sind jedoch realistische Wirkungen steigender Transportkosten bzw. die Preiselastizitäten im Luftfrachtverkehr ungeklärt. Da der Anteil der Transportkosten bei höherwertigen Gütern in der Gesamtkalkulation der Materialwirtschaft oft vernachlässigbar gering ist, erscheint eine nachfragesteuernde Wirkung einer Internalisierung externer Kosten fraglich (Schubert et al., 2014). Den negativen Umweltauswirkungen der Luftfracht sollte mit einem Maßnahmenet Rechnung getragen werden, da bislang eine wirkungsvolle Einzellösung nicht absehbar ist.

Zusammenfassung

Ein wirkungsvolles Maßnahmenpaket zur Gestaltung eines umweltschonenden Luftfrachtverkehrs sollte folgende Maßnahmen zur Verlagerung, Vermeidung und Effizienzsteigerung enthalten:

- ▶ Koordiniertes und spezialisiertes Standortnetzwerk der Luftfracht in wenig sensiblen und gering verdichteten Räumen mit einem leistungsfähigen Anschluss an alternative Verkehrsträger (Schiene, Wasserstraße).
- ▶ Ambitionierte (möglichst internationale) Lösung zur Integration der Umweltkosten im Luftfrachtverkehr, z. B. auf der Grundlage eines nationalen Konzeptes, inklusive international einheitlicher Regelungen zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen der Unternehmen.
- ▶ Förderung lokaler Wertschöpfungstiefen zur Vermeidung von Güterverkehr, insbesondere Luftfracht.

5.2.3 Intermodalität: Anbindung der Flughäfen und Verlagerung von Kurzstreckenflügen

Wenn von Verlagerung des Luftverkehrs auf die Schiene die Rede ist, geht es nach dem Verständnis des UBA nicht um ordnungspolitische Verbote dieser Flüge, sondern um eine Veränderung der Rahmenbedingung für diese Verkehrsarten zu Gunsten des Schienenverkehrs, sodass es zunehmend attraktiver wird mit dem Zug zu fahren anstatt zu fliegen. Dies gilt speziell für Verbindungen unter 1000 km Entfernung. Somit können vor allem Kurzstreckenflüge verlagert werden. Dabei handelt es sich einerseits um „Point-to-Point“-Flüge zwischen Ballungszentren innerhalb Deutschlands oder ins bzw. aus dem nahegelegenen Ausland. Andererseits führen viele Kurzstreckenflüge zu einem anderen, zumeist größeren Flughafen, um dort umzusteigen und die Flugreise zu einem weiter entfernten Ziel fortzusetzen („Feeder-Flüge“, Zubringerflüge). Grundsätzlich betreffen diese Verlagerungspotentiale gewerbliche Linienflüge.

5.2.3.1 Flughäfen eng an das Schienennetz anbinden

Entscheidend für die Verlagerung von Kurzstrecken-Zubringerflügen ist eine leistungsstarke Anbindung der Flughäfen an das Fernverkehrsnetz der Bahn – siehe hierzu auch die Planungen der Bundesregierung zu einem „Deutschland-Takt“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018). Dies sollte – wo möglich und sinnvoll – über eine direkte Anbindung an das deutsche Fernverkehrsnetz, vorzugsweise im Hochgeschwindigkeitsverkehr erfolgen, wie es schon heute z. B. bei den Flughäfen Frankfurt/Main und Düsseldorf der Fall ist. Wo netztechnisch keine direkte Einbindung an den Fernverkehr möglich oder sinnvoll ist, sollte die Anbindung indirekt über einen leistungsstarken Schienenpersonennahverkehr mit ausreichender Kapazität und dichtem Takt erfolgen.

Auch für eine umweltschonende An- und Abreise zum und vom Flughafen ist die enge Anbindung an den öffentlichen Verkehr von hoher Bedeutung. Ein leistungsfähiger Schienenanschluss, eine regelmäßige (Fern-)Busanbindung mit terminalen Haltestellen und terminalnahe Car-Sharing-Stationen machen den Verzicht auf die Anreise mit dem eigenen Pkw attraktiv. Dies spart auch wertvolle Parkplatzflächen und reduziert den Flächenverbrauch der Flughäfen.

5.2.3.2 Faktor Zeit in der Konkurrenz zwischen Luft- und Schienenverkehr

Bis zum Jahr 2030 wird bei Verbindungen, die unter vier Stunden Fahrzeit vom Schienenverkehr bedient werden können, die Bahn benutzt, weil diese das bessere Angebot bietet. Neben der besseren Schienenanbindung fördern auch das an größeren Bahnhöfen verbreitete Durchchecken von Gepäck über die Bahn zum Flugzeug (und umgekehrt) und das verpflichtende Angebot der

Rail&Fly-Option bei allen Fluggesellschaften – also die zeitgleich mit dem Flugticketkauf zu erwerbende kostengünstige Bahnreise zum Flughafen – diese Entwicklung.

Bis zum Jahr 2050 wird die Verknüpfung von Schienen- und Luftverkehr für den Kunden weiter verbessert und erhöht die Attraktivität und Akzeptanz der Anreise mit der Bahn deutlich: Das durchgehende Ticketing – also die Integration von Bahnfahrt und Flug in einem Fahrausweis, komfortabler Online-Check-in/Check-out als Regelfall und die Gepäckaufgabe/-abholung direkt von zu Hause aus macht Zubringerflüge oder die Anreise mit dem eigenen Auto überflüssig.

Parallele, zur Bahn konkurrierende Kurzstreckenflüge würden dann nicht mehr angeboten, da Fluggesellschaften sie – auch aufgrund veränderter ökonomischer Rahmenbedingungen (Abschnitt 5.1.2 und 5.2.2) – nicht mehr rentabel betreiben können. So hat in der Vergangenheit der Ausbau des Schienenhochgeschwindigkeitsverkehrs auf kürzeren Distanzen, beispielsweise zwischen Frankfurt/Main und Köln/Bonn oder Berlin und Hamburg, bereits dazu geführt, dass sämtliche Linienflüge auf diesen Relationen eingestellt wurden. Diese Entwicklung stünde auch im Einklang mit dem im aktuellen Koalitionsvertrag festgehaltenen Ziel der Verdopplung der Fahrgäste auf der Schiene bis 2030 (CDU, 2018).

Die 4-Stunden-Grenze ist in der Verkehrsforschung allgemein akzeptiert und stellt den Schwellenwert dar, bis zu welchem der Schienenverkehr zeitlich gegenüber dem Luftverkehr im Vorteil oder zumindest auf Augenhöhe ist. Zudem ermöglicht diese Reisezeit eintägige Geschäftsreisen. Zwar liegt die reine Flugzeit bei innerdeutschen Flügen häufig unter einer Stunde, aber unter Berücksichtigung der Anreise-, Check-In-, Check-Out- und Abreisezeiten ergeben sich auch hier in der Regel Gesamtreisezeiten von Stadtzentrum zu Stadtzentrum von rund vier Stunden. Speziell auf solchen Distanzen kann der Schienenverkehr die folgenden Vorteile gegenüber dem Flugzeug ausspielen (Schwarzer und Treber, 2013): siedlungsnahen Bahnhöfe (Stadtzentrum), kurze An- und Abreise, keine zeitaufwändige Abfertigungsprozesse und Sicherheitskontrollen, geringe Segmentierung der Reisezeit (Arbeiten oder Entspannen ohne Unterbrechungen) und höherer Komfort (mehr Beinfreiheit, höhere Bewegungsfreiheit, keine Anschnallpflicht).

Derzeit entspricht die 4-Stunden-Reisezeit-Schwelle im deutschen Schienenfernverkehr Entfernungen von 400 km (z. B. Hamburg-Düsseldorf) bis 600 km (z. B. Berlin-München). In Frankreich benötigt der TGV-Hochgeschwindigkeitszug sogar nur 3:18 Stunden für die rund 800 km lange Strecke von Paris nach Marseille. Dies verdeutlicht, dass ein gezielter Ausbau der Schienen-Hochgeschwindigkeitstrecken und flächendeckende Angebotsverbesserungen im Rahmen der Realisierung des „Deutschland-Takts“ bis zum Jahr 2050 ermöglichen können, sämtliche Reisezeiten zwischen den großen deutschen Ballungszentren in Richtung vier Stunden abzusenken und damit die innerdeutschen und zu großen Teilen grenzüberschreitenden Kurzstreckenflüge auf die Schiene zu verlagern. Zwar kann nicht ausgeschlossen werden, dass vor allem Geschäftsreisende trotz höherem Ticketpreis fliegen anstatt mit der Bahn zu fahren. Aus Klimaschutzsicht wären wenige dieser Kurzstreckenflüge jedoch tolerabel, zumal deren Klimawirkung deutlich geringer als die von Langstreckenflügen ist. Aus Lärmschutz und Luftqualitätssicht sind Kurzstreckenflüge zwar besonders unverhältnismäßig, dennoch können diese akzeptiert werden, sofern die entsprechenden Umweltqualitätsziele erfüllt werden (Abschnitte 3.3 und 3.4). Für den Zeithorizont 2050 ist es denkbar, dass Kurzstreckenflugzeuge zumindest teilweise elektrisch angetrieben werden, was zumindest bei Start und Landung die Lärm- und Luftschadstoffbelastung deutlich reduzieren würde.

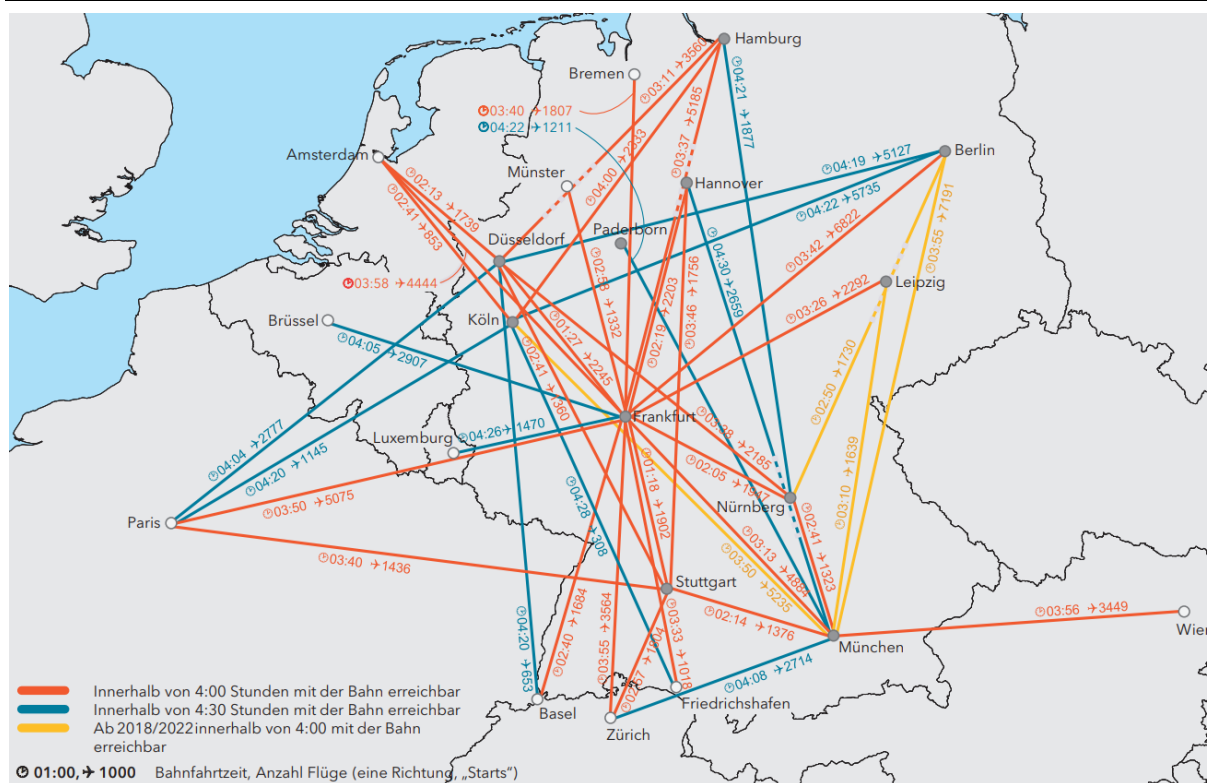
5.2.3.3 Verlagerungspotentiale

Eine aktuelle Studie von INFRAS im Auftrag des UBA (Maibach et al., 2018) untersucht die Auswirkungen auf die Reisezeiten im Geschäfts- und Freizeitverkehr bei einer Verlagerung aller innerdeutschen Flüge unter 600 km auf die Bahn. Eine solche Maßnahme würde im Jahr rund 200.000 innerdeutsche Flüge entbehrlich machen und 18,5 Mio. Reisende auf die Schiene bringen.

Dies entspricht 73 % der innerdeutschen Verkehrsleistung des Luftverkehrs. Im Gegenzug würde sich die Verkehrsleistung der Schiene um 11,7 Mrd. Personenkilometer (Pkm) erhöhen, das entspricht 29 % der Beförderungsleistung im Schienenpersonenfernverkehr des Jahres 2017. Die Studie weist 1,56 Mio. t vermiedene Treibhausgasemissionen aus (Maibach et al., 2018).

Auch das BMVI verweist darauf, dass das Flugzeug erst ab Reiseentfernungen über 500 bis 700 km aus volkswirtschaftlicher Sicht Vorteile aufweist und bezeichnet das Verlagerungspotenzial zur Schiene als „nennenswert“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017). Eine Studie der Umweltverbände (Reh et al., 2015) geht davon aus, dass mit Stand des bis 2018 umgesetzten Ausbaus des Schienennetzes unter der Prämisse des 4-Stunden-Reisezeit-Schwellenwertes 200.000 innerdeutsche und grenzüberschreitende Flüge auf die Schiene verlagert werden könnten (Abbildung 26).

Abbildung 26: Auf die Schiene verlagerbare innerdeutsche und grenzüberschreitende Kurzstreckenflüge



Auf die Schiene verlagerbare innerdeutsche und grenzüberschreitende Kurzstreckenflüge der 10 aufkommenstärksten deutschen Flughäfen (verlagerbare Strecken ab 300 Flügen pro Jahr, je Richtung, 2014)

Quelle: (Reh et al., 2015)

Dass die Reduzierung von Kurzstreckenflügen einen bedeutenden Beitrag zur Realisierung eines umweltschonenden Luftverkehrs leisten kann, zeigt auch eine Analyse des aufkommenstärksten deutschen Flughafens in Frankfurt/Main: Nach Realisierung aller im Bundesverkehrswegeplan (Zielhorizont 2030) enthaltenen Schienenprojekte würden rund ein Viertel aller heute vom Flughafen Frankfurt/Main ein- und abgehenden Passagierflüge Relationen bedienen, welche die Bahn innerhalb von vier Stunden bewältigen kann (Deutscher Bundestag, 2014); (Deutscher Bundestag, 2018).

Unbedingt notwendiger internationaler Nachtflugbetrieb (Luftfracht) wird in Deutschland an einem oder sehr wenigen Flughäfen in dünn besiedelter Umgebung abgewickelt. Auch im nationalen Güterverkehr findet eine Verkehrsverlagerung statt: Eine bessere Anbindung der Flughäfen an das deutsche Schienennetz und intensivere intermodale Kooperationen zwischen Luft- und Bahn-

fracht ermöglichen zudem leistungsstarke Güterzugverbindungen im Nachtsprung⁷¹, welche bis zum Jahr 2050 sämtliche nationalen Frachtflüge ersetzen. Ein solches Konzept wurde bereits in 2008 mit dem „AirCargoExpress“ zwischen den Flughäfen Frankfurt/Main und Leipzig/Halle erfolgreich entwickelt, um bis zu 10.000 Lkw-Fahrten pro Jahr zu ersetzen (Fraport AG - Frankfurt Airport Services Worldwide, 2008). Das Produkt konnte jedoch „nicht am Markt platziert werden“ (Fraport AG - Frankfurt Airport Services Worldwide, 2011).

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die dargelegte Zielstellung in gleichem Maße auch für den grenzüberschreitenden Personenfernverkehr gilt. Bereits heute haben sich leistungsstarke Hochgeschwindigkeitsrelationen von Stuttgart, Frankfurt, Köln und Düsseldorf nach Paris, Brüssel und Amsterdam etabliert, welche für den Luftverkehr eine starke Konkurrenz darstellen (Abbildung 26). Auch hier sollten die Weichen durch den weiteren Ausbau des Schienennetzes in Richtung des umweltschonenden Verkehrsträgers Schiene gestellt werden.

5.2.4 Umweltverträglicher Tourismus

5.2.4.1 Charakteristik und Umweltrelevanz des Reisens

Der grenzüberschreitende Tourismus weltweit wird im Wesentlichen mit dem Auto oder mit dem Flugzeug realisiert. Im Jahr 2017 nutzten 56 % der deutschen Touristinnen und Touristen das Flugzeug, um an ihr Auslandsreiseziel zu gelangen (Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen e.V., 2018). Der Tourismus ist für 3,9 % bis 8 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich (IPCC, 2013; Lenzen, 2018). Geht diese Entwicklung weiter wie bisher, dann ist mit einem Anstieg der tourismusbedingten Emissionen um 130 % zwischen 2005 und 2035 zu rechnen (Nicholls, 2014). Drei Viertel dieser Treibhausgasemissionen stammen aus dem diesbezüglichen Reiseverkehr, wovon 40 % durch den Luftverkehr verursacht werden - mit stetig steigender Tendenz (Bundesministerium für Umwelt et al., 2017).

Um die ökonomischen Entwicklungen durch Tourismus auf hohem Niveau zu halten, erschließt die Branche immer neue Märkte, im Zuge der Globalisierung auch immer stärker Fernmärkte in aufstrebenden Entwicklungs- und Schwellenländern. Diese Tendenz führt jedoch dazu, dass der an Mobilität geknüpfte Tourismus zukünftig global zu einem der bedeutungsvollsten Treiber des Klimawandels werden kann (Gossling, 2011). Wengleich auch die Wahrnehmung des Problems des CO₂-Ausstoßes bei Flugreisen immer größer wird, weisen Studien keine Veränderungen des Reiseverhaltens von Reisenden nach (Cohen et al., 2011).

Nach dem CO₂-Bilanzrechner des UBA (KlimAktiv, 2019) entstehen beispielsweise für einen Hin- und Rückflug von Berlin-Tegel nach Las Palmas bei der geflogenen Distanz von 7.232 km (Hin- und Rückflug) insgesamt 2,15 t CO₂. Für eine 4-köpfige Familie entspricht dies einer CO₂-Emission von 8,6 t. Um diese Zahlen greifbarer zu machen, bietet sich das Model des Emissionsbudgets des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) an (Schellnhuber et al., 2009) sowie eine Weiterentwicklung, die pro-Kopf-Aussagen zulässt. Bezogen auf die Erreichung des globalen 2 °C-Zieles geht der WBGU bei einer durchschnittlichen Weltbevölkerung von 8,2 Mrd. Menschen im Zeitraum 2010 bis 2050 von einem durchschnittlichen jährlichen Emissionsbudget eines Menschen von 2,3 t CO₂ aus. Bei dem ambitionierteren 1,5 °C-Ziel wäre das Budget entsprechend geringer.

Die einzelnen Familienmitglieder haben also mit einer einzigen Urlaubsreise den größten Anteil ihres Jahresbudgets aufgebraucht (KlimAktiv, 2019). Ihr Haus beheizt und beleuchtet, sich Kleidung und Nahrungsmittel gekauft, den Alltagsverkehr bestritten hat die Familie dabei noch nicht.

⁷¹ Fachbegriff für den Transport über Nacht im Rahmen des üblichen 24 h Lieferzeitversprechen.

Die Verantwortung für Nachhaltigkeit ist nicht einseitig bei den Reisenden zu verorten. Denn zu oft scheitert dies an verfügbaren Informationen oder schlichtweg an der Vermittlung passender Angebote. Vereinfacht besteht eine Reise aus drei Bausteinen: der An- und Abreise, der Unterkunft und Verpflegung sowie den Aktivitäten und Ausflügen vor Ort. Jede dieser Komponenten wirkt sich auf die gesamte Umwelt- und Klimabilanz des Urlaubs aus. So entfallen durchschnittlich 40 % der CO₂-Emissionen auf Flugreisen, 32 % auf den Autoverkehr und 21 % auf die Unterkünfte. Reisende können diese Auswirkungen ganz bewusst durch eine umwelt- und klimabewusste Urlaubsplanung und -gestaltung steuern.⁷²

5.2.4.2 Alternatives Reiseverhalten und Trends

In einer Zeit der Globalisierung, der Digitalisierung, des Wohlstandes, sinkender Reisekosten, besserer Erreichbarkeit zu mehr Flughäfen, zunehmender Individualisierung und einer steigenden Informationsflut sowie der fast uneingeschränkten Mobilität mit schnellen Ortswechseln und immer häufigeren, aber kürzeren Reisen, zeichnet sich ein vorsichtiger Trend zu alternativem Reiseverhalten ab. Dieser wird gefördert durch Bewegungen wie Slow-Food, Entschleunigung oder Achtsamkeit, die gleichzeitig hohes Potenzial für eine Veränderung der Wertesysteme haben.

Beim Trend des „langsamen Reisens“ wird das Reisen mit dem Zug, mit dem Rad oder zu Fuß zum integralen Teil des Reiseerlebnisses, wobei der CO₂-Ausstoß der Reise stark minimiert wird (Dickinson et al., 2011). Diese „Slow Tourism“-Reisen haben das Potenzial zum langfristigen Trend; schon jetzt haben sie die Reiseindustrie nachhaltig beeinflusst. Ein weiterer Trend sind die sogenannten „staycation“ (Wortschöpfung: „stay“: bleiben; „cation“ von „vacation“) oder der New Urban Tourism. Hier geht es auch darum, gerade nicht aufwändig zu verreisen, sondern die Angebote der Wohnumgebung zu nutzen (Germann Molz, 2009). Damit werden Bewohnerinnen und Bewohner zu Tagesgästen in der eigenen Stadt. Solche Reisearten werden begünstigt durch den Ausbau des Öffentlichen Nahverkehrs (ÖPNV) sowie des Fuß- und Fahrradverkehrs. Vorteilhaft ist es auch, in touristischen Destinationen Angebote jeglicher Art zur Elektromobilität bereit zu stellen, da die Reisenden im Urlaub mehr Zeit haben sowie probier- und experimentierfreudiger sind.

5.2.4.3 Kurze Anreisewege und längere Aufenthalte

Bei der Urlaubsplanung sollte darauf geachtet werden, eine möglichst kurze Anreisestrecke zurückzulegen. Dabei gilt: Je näher das Ziel ist, desto besser für die Umwelt. Viele Urlaubsziele, die Erholung, Strand und Wasser, aber auch Kultur und Raum für sportliche Aktivitäten bieten, liegen auch schon in einer Entfernung, die an einem Tag mit dem Zug oder Auto bewältigt werden kann.

Je weiter ein Ziel entfernt ist, desto länger sollte der Aufenthalt vor Ort sein. Eine Faustregel lautet: Für einen Flug bis 2.000 km Distanz sollten eine Mindestaufenthaltsdauer von acht Tagen vorgesehen werden, über 2.000 km eine Aufenthaltsdauer von mindestens 14 Tagen (Monshausen et al., 2014). Derzeit geht jedoch der Trend zu immer kürzeren Flugfernerreisen, dazu zählen selbst Kurzreisen von wenigen Tagen auf andere Kontinente. Dies sind vorwiegend Reisen zwischen Städten, die durch die Nähe zu internationalen Flughäfen gut erreichbar sind. Dabei hat ein längerer Aufenthalt am Urlaubsort mehrere Vorteile: Der Reisende gewinnt mehr Zeit und durch den Konsum eines umfangreicheren touristischen Produktes profitiert auch die Wirtschaft in den Zielregionen.

⁷² Für verkehrs- bzw. mobilitätsübergreifende Tipps zum nachhaltigen Reisen: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/garten-freizeit/urlaubsreisen>.

5.2.4.4 Wahl des Verkehrsmittels

Neben der Entfernung spielt auch die Wahl des Verkehrsmittels für die An- und Abreise eine große Rolle. Bei größeren Distanzen ist die Anreise mit Bus oder Bahn am umwelt- und klimaschonendsten. Flugreisen sollten vermieden werden, denn jeder vermiedene Flug bringt eine beachtliche Einsparung an CO₂-Emissionen mit sich. Besonders Kurzstreckenflüge belasten die Umwelt überdurchschnittlich. Im Übrigen ist ein voll besetztes Auto weit umweltfreundlicher als die Anreise mit dem Flugzeug. Für Aktivitäten und Ausflüge vor Ort sollte der ÖPNV oder das Fahrrad genutzt werden.

5.2.4.5 Freiwillige CO₂-Kompensationen von Flugreisen

Ist eine Flugreise nicht zu vermeiden, besteht die Möglichkeit die Treibhausgasemissionen durch freiwillige Kompensationszahlungen für Klimaschutzprojekte auszugleichen.⁷³ Aufgrund der damit verbundenen Kostenerhöhung der Urlaubsreise liegt derzeit die freiwillige Kompensationsrate im einstelligen Prozentbereich. Allerdings haben schon frühere Analysen des UBA gezeigt, dass seit 2012 ein stetiges Wachstum bei der Nutzung von Kompensationsangeboten zu verzeichnen ist, das sich im laufenden Jahr noch verstärkt haben dürfte.

Bei der Wahl der Anbieter von Kompensationsprojekten ist darauf zu achten, dass die Emissionen transparent und realistisch berechnet und den Klimaschutzprojekten hohe Qualitätskriterien mit genauer Zusätzlichkeitsprüfung durch externe Prüfer zugrunde gelegt werden. Ein besonderer Beitrag der Klimaschutzprojekte zur nachhaltigen Entwicklung im Gastgeberland neben der reinen Treibhausgasminderung, beispielsweise die Schaffung von Arbeitsplätzen, Energiebereitstellung im ländlichen Raum oder ein zusätzlicher Gesundheitsschutz, steigert die Wirkung von Projekten (Götz et al., 2018).

Beispielhafte Tourismusprojekte

Die Alpine Pearls sind 25 Gemeinden im Alpenraum, die Qualitätstourismus nach den Prinzipien der Nachhaltigkeit fördern. Dazu zählen insbesondere Mobilitäts- und Tourismuskonzepte mit dem größtmöglichen Verzicht auf umweltbelastende Faktoren im Tourismus- und Verkehrsbereich, Erhalt von Landschaft und Natur, erneuerbare Energieerzeugung, Müllvermeidung und die Verwertung regionaler Produkte. Dazu wurde eigens ein Kriterienkatalog erstellt, anhand dessen die einzelnen Tourismusgemeinden regelmäßig überprüft werden. Alle Mitgliedsorte verbindet ein komfortabler Urlaub, vorzugsweise ohne Auto mit umweltfreundlicher Mobilitätsgarantie vor Ort, das heißt Anreise mit Bus oder Bahn, inklusive Abholservice und garantierter Nutzung eines meist kostenlosen oder stark ermäßigten öffentlichen Nahverkehrs.⁷⁴

5.2.5 Mobilitätsmanagement

5.2.5.1 Definition Mobilitätsmanagement

„Mobilitätsmanagement ist ein Ansatz zur Beeinflussung der Verkehrsnachfrage mit dem Ziel, den Personenverkehr effizienter, umwelt- und sozialverträglicher und damit nachhaltiger zu gestalten. Mobilitätsmanagement bietet den Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmern durch „weiche“ Maßnahmen aus den Bereichen Information, Kommunikation, Motivation, Koordination und Service Optionen, ihr Mobilitätsverhalten und ihre Einstellungen zur Mobilität zu verändern. Dabei übernehmen Akteure, wie z. B. Betriebe [und öffentliche Einrichtungen], Verantwortung für

⁷³ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/freiwillige-co2-kompensation-durch>.

⁷⁴ <https://www.alpine-pearls.com>

den von ihnen verursachten Verkehr und kooperieren mit Kommunen, Verkehrsbetrieben und -anbietern.“ (Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung, 2018).

5.2.5.2 Betriebliches Mobilitätsmanagement

Die Bundesregierung hat im „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ neben zahlreichen anderen Maßnahmen auch eine zur Förderung des betrieblichen Mobilitätsmanagements beschlossen. Ein effizientes Mobilitätsmanagement kann einen wichtigen Beitrag zur notwendigen Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes im Verkehrsbereich leisten. Neben den Beiträgen zur Reduzierung umweltschädlicher Emissionen wie Luftschadstoffe, Feinstaub, Lärm und zur Einsparung von CO₂-Emissionen kann betriebliches Mobilitätsmanagement weitere positive Effekte für eine nachhaltige und integrierte Verkehrsentwicklung sowie die Verbesserung der Gesundheit der Beschäftigten (z. B. durch Förderung des Fuß- und Radverkehrs) bewirken. Zudem sind aus ökonomischer Sicht Einspar- und Entlastungseffekte hinsichtlich Kosten, Flächeninanspruchnahme und Ressourcen zu erwarten.

BMU und BMVI fördern das betriebliche Mobilitätsmanagement in zwei Phasen. In der ersten Phase hat das BMU einen Ideenwettbewerb unter dem Titel „mobil-gewinnt“ gefördert, in der zweiten Phase werden die ausgezeichneten Wettbewerbsbeiträge auf der Grundlage einer eigenen Förderrichtlinie durch das BMVI umgesetzt. Darüber hinaus wurden bis zu 300 Erstberatungen zur Einführung eines betrieblichen Mobilitätsmanagements gefördert.⁷⁵

5.2.5.3 Behördliches Mobilitätsmanagement

Im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland hat der Staatssekretärsausschuss für nachhaltige Entwicklung bereits im Jahr 2010 ein „Maßnahmenprogramm Nachhaltigkeit“ beschlossen. Mit diesem Programm, das im Jahr 2015 wesentlich weiter entwickelt worden ist, verpflichtet sich die Bundesregierung, ihr Verwaltungshandeln nachhaltig auszurichten. Das Maßnahmenprogramm ist von allen derzeit 116 Behörden und Einrichtungen der unmittelbaren Bundesverwaltung umzusetzen. Der letzte Monitoringbericht für das Jahr 2016 wurde im April 2017 veröffentlicht (Umweltbundesamt, 2016).

Unter Punkt 8 des Maßnahmenprogramms sollen konkrete Maßnahmen zur weiteren Reduzierung und Kompensation verkehrsbedingter und standortbezogener CO₂-Emissionen insbesondere bei Arbeitswegen und Dienstreisen der Beschäftigten umgesetzt werden. Das Maßnahmenprogramm sieht vor, dass im BMU und BMVI beispielhaft die schrittweise Einführung eines Mobilitätsmanagements geprüft und erprobt wird. Dazu werden verschiedene Handlungsfelder betrachtet: Fuhrparkmanagement, umweltverträgliche Dienstreisen, nachhaltige Mobilität der Beschäftigten auf den Arbeitswegen und Kundenverkehre.

Im UBA ist das Mobilitätsmanagement seit vielen Jahren in das europäische EMAS-Umweltmanagement (EMAS – Eco-Management and Audit Scheme) integriert. Es wurde u. a. ein Fuhrparkkonzept zur kontinuierlichen Verbesserung der Umweltbilanz der Fahrzeugflotte erarbeitet. Zudem gibt es Leitlinien für umweltverträgliche Dienstreisen. Bei Inlandsdienstreisen nutzen drei Viertel der Beschäftigten die Bahn, bei Auslandsdienstreisen knapp ein Viertel. In der EMAS-Umwelterklärung, die jährlich von einem externen Gutachter validiert und vom UBA veröffentlicht wird, wird über den Umsetzungsstand der Ziele und Maßnahmen zur Verringerung der Umweltbelastungen in den drei genannten Bereichen berichtet. Auf der Grundlage von regelmäßigen Mobilitätsbefragungen der Beschäftigten bezogen auf Arbeitswege und Dienstreisen, wird der Erfolg der umgesetzten Maßnahmen überprüft. Die Befragungen finden alle drei bis vier Jahre statt. Die letzte Befragung erfolgte im Jahr 2017 (Janßen et al., 2018).

⁷⁵ <http://www.mobil-gewinnt.de>

Um die Bundesverwaltung bei der Einführung und Umsetzung von Maßnahmen im Mobilitätsmanagement zu unterstützen, führte das Deutsche Institut für Urbanistik (Difu) im Rahmen eines vom BMU und UBA geförderten Forschungsprojektes Workshops mit Mitarbeitenden aus den Ministerien und der Bundesverwaltung zum Fuhrparkmanagement, Dienstreisen und Beschäftigtenmobilität durch. Im Ergebnis hat das Difu ein Handlungsleitfaden mit Maßnahmenvorschlägen zum behördlichen Mobilitätsmanagement erarbeitet. Dieser wurde im Mai 2019 vom UBA veröffentlicht.⁷⁶

5.2.5.4 Handlungsfeld Dienstreisen

Bei Dienstreisen gibt es unterschiedliche Ansatzpunkte, Flugreisen zu vermeiden, zu verlagern oder effizienter zu gestalten. Um die Umweltbelastungen durch Dienstreisen zu vermeiden, sollten die technischen und organisatorischen Möglichkeiten für die Durchführung von Telefon- und Videokonferenzen ausgebaut und weiter verbessert werden. Bei Inlandsdienstreisen sollte die Bahn das Verkehrsmittel der ersten Wahl sein, da alle Bahnfahrten in der Bundesverwaltung im Regional- und Fernverkehr mit der DB AG mit Strom aus erneuerbaren Energien durchgeführt werden. Auch bei Auslandsdienstreisen sollte die Bahn bei einem guten Angebot gegenüber dem Flugzeug bevorzugt werden.

Bei notwendigen Flugreisen sollten Direktflüge gegenüber Flügen mit zusätzlichen Starts und Landungen gewählt werden, weil dadurch zusätzliche Geräusch- und Schadstoffemissionen durch Zwischenstopps und Umstiege vermieden werden können. Bisher steht dem das Wirtschaftlichkeits- und Sparsamkeitsprinzip im Bundesreisekostenrecht (BRKG) entgegen, wenn die Preise bei Flügen mit Umstiegen niedriger sind.

CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Klimaeffekte, die durch nicht vermeidbare Dienstreisen mit dem Flugzeug und Dienstkraftfahrzeug entstehen, werden derzeit von der Bundesregierung durch den Erwerb von Emissionsminderungsgutschriften aus anspruchsvollen internationalen Klimaschutzprojekten kompensiert.⁷⁷ Das UBA nutzt für die Beurteilung der gesamten Klimawirksamkeit der Dienstflugreisen, inklusive der Nicht-CO₂-Klimaeffekte, derzeit einen Radiative Forcing Index (RFI) von 3,0, das heißt der errechnete CO₂-Ausstoß wird mit dem Faktor drei multipliziert.⁷⁸ Im Ergebnis werden zum Ausgleich der gesamten Klimawirkungen pro emittierter Tonne CO₂ drei Emissionsminderungsgutschriften aus Klimaschutzprojekten erworben. Beschafft werden nur Gutschriften aus Projekten, die nach den UN-Regeln unter dem sogenannten Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) des Kyoto-Protokolls zertifiziert und nach zusätzlichen vom UBA entwickelten Qualitätskriterien ausgewählt worden sind. Anschließend werden diese Gutschriften gelöscht und auf diese Weise dem Markt entzogen (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt, 2017). Diese Maßnahme basiert auf einem Beschluss der Bundesregierung und umfasst derzeit alle Ministerien und Bundesoberbehörden sowie weitere nachgeordnete Bereiche. Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen und die Kompensation ist das UBA verantwortlich. Im Jahr 2018 emittierten die beteiligten 116 obersten und oberen Bundesbehörden rund 310.000 t CO_{2e} aufgrund ihrer Dienstreisen und -fahrten mit Flugzeug und Dienst-Pkw.

Durch Leitlinien für umweltverträgliche Dienstreisen können Führungskräfte und Beschäftigte dazu angeregt werden, bei der Planung und Durchführung von Dienstreisen das Verkehrsmittel mit den geringsten Umweltbelastungen zu wählen (Bölke, 2016). Diese könnten auch für andere öffentliche Einrichtungen auf Bundes-, Landes- und Kommunalebene eingeführt werden.

⁷⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/mobilitaetsmanagement-in-der-bundesverwaltung>.

⁷⁷ https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/Factsheet_Dienstreisen-BReg.pdf?__blob=publicationFile&v=9

⁷⁸ Zur wissenschaftlichen Diskussion zur Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte siehe Abschnitt 3.2.3.

Weiterentwicklungen des Dienstreiserechts

Grundlage für die Planung und Durchführung von Dienstreisen in der Bundesverwaltung ist das BRKG mit den dazugehörigen Verwaltungsvorschriften.

Bei der Vergütung der notwendigen Reisekosten entsprechend § 3 Abs. 1 BRKG, ist das Sparsamkeits- und Wirtschaftlichkeitsgebot gemäß § 7 Abs. 1 in Verbindung mit § 34 Abs. 2 der Bundeshaushaltsordnung (BHO) anzuwenden (Bracher et al., 2003). Dies führt praktisch dazu, dass bei der Verkehrsmittelwahl das umweltverträglichere Verkehrsmittel nur dann gewählt kann, wenn reisekostenrechtliche Vorschriften und dienstliche Gründe dem nicht entgegenstehen. Das ist aber immer dann der Fall, wenn die Reisekosten mit dem Flugzeug deutlich preisgünstiger sind als mit der Bahn. Es gibt bisher keine klare Rangfolge bei der Verkehrsmittelwahl, bei der die Kosten und ökologischen Wirkungen gleichermaßen berücksichtigt werden, weil das Sparsamkeits- und Wirtschaftlichkeitsgebot nach den Haushaltsgrundsätzen immer zu berücksichtigen ist.

Ein möglicher Ansatz wäre, im ersten Schritt eine Billigkeitsregelung für die gesamte Bundesverwaltung zu treffen, wonach bei Preisunterschieden bis zu einer bestimmten Höhe (z. B. bis zu 150 € oder 20 bis 30 %) das jeweils umweltverträglichere Verkehrsmittel gewählt werden kann. Dies könnte im Rahmen des gegebenen Ermessensspielraumes im Verwaltungshandeln durch das Travelmanagement beim Bundesverwaltungsamt praktiziert werden. Im nächsten Schritt wäre rechtlich zu prüfen, ob unabhängig von den genannten Grundsätzen in der BHO und im BRKG eine klare Rangfolge bei der Verkehrsmittelwahl mit den geringsten Umweltwirkungen unabhängig von den Preisunterschieden festgelegt werden kann. Grundlage für die Festlegung der Rangfolge könnten die mit dem Transport Emission Model (TREMODO) ermittelten durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel sein (Bölke, 2016). Zumindest sollte es eine Gleichrangigkeit zwischen dem Wirtschaftlichkeits- und Sparsamkeitsprinzip und der umweltverträglichen Verkehrsmittelwahl im BRKG geben. Eine Anpassung des BRKG und der dazugehörigen Verwaltungsvorschrift wäre hierfür notwendig.

Auch bei der anteiligen Erstattung der Kosten für eine privat angeschaffte Bahncard gilt das Sparsamkeits- und Wirtschaftlichkeitsgebot gemäß § 3 Abs. 1 BRKG. Dienstreisende haben demzufolge gemäß Pkt. 4.2.4 Satz 2 BRKGVwV keinen Anspruch auf anteilige Erstattung ihrer dienstlich genutzten privaten Bahncard. Die Kosten einer nicht aus dienstlichen Gründen gekauften Bahncard können auf Antrag erstattet werden, wenn sie sich vollständig amortisiert haben; eine anteilige Erstattung ist ausgeschlossen. Es gilt das sogenannte Amortisationsprinzip. Von dieser Regelung gibt es nunmehr eine Ausnahme: Abweichend von Ziffer 4.2.2 BRKGVwV ist mit einem Rundschreiben des Bundesinnenministeriums vom 19.09.2018 die Teilerstattung von Dienstreisekosten bei einer privat angeschafften Bahncard 100 möglich. Durch die Reisekostenabrechnung werden für alle dienstlichen Fahrten ab dem 19.09.2018, die mit der Bahncard 100 durchgeführt wurden, die aktuellen Fahrpreise (ohne Bahncard 100) fiktiv ermittelt. Ergibt sich auf der Grundlage der ermittelten Fahrpreise, dass der Einsatz einer Bahncard 25 oder 50 wirtschaftlich gewesen wäre, können die Anschaffungskosten einer Bahncard 25 oder 50 sowie die Fahrtkosten unter Berücksichtigung des entsprechenden Bahncard-Rabatts fiktiv erstattet werden. Ergibt die Prüfung, dass sich keine Bahncard amortisieren würde, werden für die dienstlichen Fahrten, für die die Bahncard 100 eingesetzt wurde, die Fahrpreise (ohne Bahncard-Rabatt) zu den Konditionen des Bundes als Großkunde fiktiv erstattet. Die neue Regelung ist gerecht, weil diese Dienstreisenden bisher Reisekosten mit der Bahncard 100 nur erstattet bekamen, wenn diese sich vollständig amortisiert hat. Darüber hinaus bietet die neue Regelung einen Anreiz, auch für private Fahrten auf die Bahn umzusteigen.

5.2.6 Übersicht nationaler Maßnahmen und Instrumente

In Tabelle 10 sind die Maßnahmen und Instrumente zum Umwelt- und Klimaschutz zusammenfassend aufgeführt, die auf nationaler Ebene erforderlich sind. Dabei ist jeweils der Zeitpunkt an-

gegeben, ab denen diese spätestens wirken sollen sowie die Akteure, die diese beschließen und umsetzen sollen.

Tabelle 10: Zusammenstellung nationaler Maßnahmen und Instrumente

Maßnahmen und Instrumente	Spätester Wirkungszeitpunkt	Wer beschließt?	Wer setzt um?
Erstellung eines unter Umweltschutzaspekten optimierten Standortkonzepts für das nationale Flughafensystem	2030	Bund	Bund, Länder
Umsetzung des Flughafen-Standortkonzepts an allen betroffenen Flughäfen	2050	Bund, Länder	Bund, Länder
Erschließung der auszubauenden Flughäfen im Bundesverkehrswegeplan (vorrangig durch Schieneninfrastruktur)	2050	Bund	Länder
Ergänzung der gesetzlich vorgeschriebenen Beteiligung in Zulassungsverfahren für Flughafenbau oder -erweiterung durch frühzeitige und wirksame Öffentlichkeitsbeteiligung in informellen Verfahren	2030	Bund	Länder
Erhebung des EU-Mindestenergiesteuersatzes auf Kerosin von 33 Cent/l für inländische Flüge	2020	Bund	Fluggesellschaften
Bilaterale Abkommen mit EU-Staaten zur Erhebung des EU-Mindeststeuersatzes auf Kerosin von 33 Cent/	2030	Bund, EU-Staaten	Fluggesellschaften
Weiterführung und Weiterentwicklung der Luftverkehrssteuer, insbesondere Erhöhung auf 2 Mrd. € p.a., Entkopplung vom Emissionshandel, Einbezug von Frachtflügen, Höhergewichtung Tarif für Kurzstrecke	2020	Bund	Fluggesellschaften
Erhöhung der Luftverkehrssteuer auf Höhe der MwSt-Verlust (ca. 4,2 Mrd. € p.a.), Differenzierung/Anreize bzgl. Lärm und Emissionen	2030	Bund	Fluggesellschaften
Schaffung eines Innovations- und Demonstrationfonds Luftverkehr, insbesondere für die Markteinführung nachhaltiges PtL	2020	Bund	Bund
nationale PtL-Beimischquote von 10 %, bilaterale Abkommen mit EU-Staaten	2030	Bund, EU-Staaten	Inverkehrbringer von Flugkraftstoffen
Setzung strenger Nachhaltigkeitskriterien für die PtL-Herstellung	2030	Bund	Inverkehrbringer von Flugkraftstoffen
100% Deckung des Kerosinbedarfs durch nachhaltiges Kraftstoffe	2050	Bund	Inverkehrbringer von Flugkraftstoffen
Erhöhung der Lenkungswirkung lärmabhängiger Start- und Landeentgelte	2030	Bund	Länder, Flughäfen
Erhebung NO _x -abhängiger Start- und Landeentgelte an allen deutschen Flughäfen, verursachergerechte Kostenanlastung, Einführung auch für (Ultra-)Feinstaubpartikel und deren relevanter Vorläufersubstanzen	2030	Bund	Länder, Flughäfen

Maßnahmen und Instrumente	Spätester Wirkungszeitpunkt	Wer beschließt?	Wer setzt um?
Begrenzung des Tankvolumens von Langstreckenflugzeugen zur Verhinderung von sehr weiten Langstreckenflügen	2050	ICAO	Luftfahrzeughersteller, Luftfahrzeugzulassungsbehörden
Politikfeldübergreifende Gestaltung von Wertschöpfungsketten zur Stärkung der lokalen Fertigungstiefe zur Vermeidung von Güterverkehr, insbesondere Luftfracht	2030	Bund	Unternehmen
Anbindung Flughäfen an den öffentlichen Nahverkehr und das Schienenverkehrsnetz	2050	Bund, Länder	Bund, Länder
Ermöglichung von Zugreisezeiten zwischen deutschen Ballungszentren und Flughäfen von vier Stunden, Verlagerung von Kurzstreckenflügen auf die Bahn	2050	Bund, Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)	EVU
Schaffung leistungsstarker Güterzugverbindungen, Verlagerung nächtlicher nationaler Frachtflüge auf die Bahn	2050	Bund, EVU	EVU, Logistikunternehmen
Auf umweltschonende Reiseoptionen in geeigneter Form aufmerksam machen insbesondere bzgl. Wahl des Reiseziels und Verkehrsmittels	2030	Bund	Reiseanbieter
Verstärken des ökologischen Mobilitätsmanagement bei Unternehmen und Behörden, auch Landes- und Kommunalbehörden, inkl. CO ₂ -Kompensationen von Flugreisen	2030	Unternehmen, Behörden	Unternehmen, Behörden
Verbesserung der Durchführung bzw. verstärkte Nutzung von Telefon- und Videokonferenzen als Ersatz für Dienstreisen	2030	Unternehmen, Behörden	Unternehmen, Behörden
Änderung des Bundesreisekostengesetzes: Gleichrangigkeit zwischen Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit eines Verkehrsmittels für eine Dienstreise von Bundesbediensteten	2020	Bund	Bundesbedienstete

5.3 Instrumente und Maßnahmen auf lokaler Handlungsebene

5.3.1 Lärmkontingentierung

5.3.1.1 Bottom-Up- versus Top-Down-Ansatz in der Fluglärminderung

Zum Schutz vor Fluglärm bestehen verschiedene Ansatzpunkte und rechtliche Regelungen. Es fehlt jedoch ein übergeordnetes, zielorientiertes Rahmeninstrument, um die vielfältigen Lärmschutzmaßnahmen zu koordinieren, optimieren oder gegebenenfalls überhaupt erst zur Anwendung zu bringen. Zudem sind für verschiedenen Maßnahmen des Fluglärmschutzes unterschiedliche Akteure verantwortlich. Somit kann nicht sichergestellt werden, dass ein gesetztes Ziel, wie das Erreichen einer akzeptablen Fluglärmsituation, zu einem bestimmten Zeitpunkt auch tatsächlich erreicht wird. Durch die unkoordinierte Anwendung der verschiedenen Maßnahmen (Bottom-Up-Ansatz) ist sowohl eine Über- als auch Untersteuerung bezüglich des gesetzten Zieles möglich.

Diese Unsicherheiten können durch einen Top-Down-Ansatz in Form einer Lärmkontingentierung vermieden werden. Dabei kann einerseits die maximal zulässige Geräuschbelastung als „Lärmobergrenze“ / Kontingent festgelegt werden, die auf eine Person oder ein Grundstück dauerhaft einwirken darf. Alternativ oder zusätzlich kann auch ein Lärmindex als Produkt aus der Anzahl der Betroffenen in einzelnen Pegelklassen mit einer Lärmbewertungszahl pro Pegelklasse verwendet werden. Ein solcher Lärmindex wird beispielsweise am Verkehrsflughafen Frankfurt/Main eingesetzt, um die Lärmentwicklung in der Region und die Wirkung einzelner Minderungsmaßnahmen zu ermitteln (Gemeinnützige Umwelthaus GmbH, 2019).

5.3.1.2 Prinzip und Vorteile der Lärmkontingentierung

Zentrales Prinzip einer Lärmkontingentierung ist die Festsetzung eines bestimmten Lärmschutzzieles bei gleichzeitiger Liberalisierung des Einsatzes der diesbezüglichen Einzelinstrumente. Dieses Prinzip ist in ähnlicher Form im CO₂-Emissionshandel der europäischen Klimapolitik etabliert. Als wichtigsten Vorteil gewährleistet dieses Instrument eine gesicherte Zielerreichung. Hierbei ist es entscheidend, dass das angestrebte Ziel zwar ambitioniert, aber dennoch realistisch erreichbar ist. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ermöglicht eine Top-Down-Lärmkontingentierung zudem den optimalen Einsatz der Finanzmittel, da – als Folge der diesbezüglichen Liberalisierung – zuerst die effizientesten Instrumente / Maßnahmen ergriffen werden. Im Gegensatz zu anderen Sachbereichen, für die eine derartige Regelung als nicht praktikabel verworfen wurde, erscheint die Realisierung einer Lärmkontingentierung im Luftverkehr durchaus machbar. Dafür spricht, dass der Luftverkehr von relativ wenigen Akteuren bestimmt wird – vor allem Flughafen- und Fluggesellschaften. Zudem ist die Zahl der Verkehrereignisse relativ gering und der Flugbetrieb insgesamt überwiegend strikt geordnet.

Für die Erforderlichkeit und Realisierbarkeit dieser Strategie spricht auch, dass einige Flughafen-Planfeststellungen schon ähnliche Regelungen enthalten. Oftmals wird als Kompromiss zwischen den Interessen der Luftverkehrswirtschaft und den Lärmbetroffenen eine Art der Belastungsdeckelung angestrebt. Dabei wurden früher häufig Begrenzungen der Flugbewegungszahlen vorgenommen oder Lärmpegel an bestimmten Immissionsorten in der Flugplatzumgebung vorgegeben, die nicht überschritten werden durften. Diese Vorgehensweisen werfen jedoch einige Probleme auf. So ist z. B. die Flugbewegungskontingentierung, wenn überhaupt, nur indirekt in der Lage, die Geräuschbelastung zu begrenzen. Selbst bei gleicher Flugbewegungszahl

kann die Geräuschbelastung (in Abhängigkeit von der Luftfahrzeugmasse und damit dem erforderlichen Triebwerksschub) durch den vermehrten Einsatz schwererer Luftfahrzeuge steigen. Zudem widerspricht dies dem grundsätzlichen Ziel der Umweltpolitik, nicht die durchaus gewünschten Verkehrsaktivitäten zu reglementieren, sondern deren negative Umweltauswirkungen.

5.3.1.3 Ermittlung der Belastung und Konfliktanalyse

Nach der als fortschrittlicher angesehenen Kontingenzierungs-Variante der Lärmindizes wird als erster Schritt die Lärmbelastungssituation an einem Flughafen anhand der Betroffenenzahlen in einzelnen Pegelklassen bestimmt (Abschnitt 3.4.1). Hierfür wird auf der Grundlage der Flugbetriebsdaten des betrachteten Flughafens die Fluglärmbelastung mit einem etablierten Berechnungsverfahren ermittelt und die Ergebnisse mit der Bevölkerungsverteilung verschnitten. Es bietet sich vor allem aufgrund der Datenverfügbarkeit an, immer das letzte zurückliegende Jahr zu Grunde zu legen. Wichtig ist, dass ein möglichst realitätsnahes und differenziertes Flugbetriebsmodell verwendet wird, um auch kleinere Änderungen im Flugbetrieb und Wirkungen von Lärminderungsmaßnahmen abbilden zu können. Anschließend wird die Anzahl der vom Fluglärm betroffenen Personen in möglichst fein abgestuften Pegelklassen bestimmt und mit einer Expositions-Wirkungs-Funktion gewichtet, die möglichst alle relevanten Lärmwirkungen bewertet.

Zudem sollten die konkreten ortsbezogenen Belastungen ermittelt und reguliert werden. Damit soll ausgeschlossen werden, dass die Entlastung vieler „moderat belasteter“ Personen mit einer noch höheren Lärmbelastung von einigen wenigen bereits hochbelasteten Personen einhergeht.

Als Lärmindikatoren sind sowohl Dauerschall- als auch Maximalpegelkriterien oder wirkungsbezogene Kenngrößen wie das Aufwachkriterium des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) denkbar. Als Zeitbetrachtung bietet sich eine Differenzierung nach Tag (06:00 – 22:00 Uhr) und Nacht (22:00 – 06:00 Uhr) an. Es können aber auch der L_{DEN} der EU-Umgebungslärmrichtlinie, die lauteste Nachtstunde und auch unterschiedliche Modelle zur Berücksichtigung der wechselnden Start-/Landebahn-Betriebsrichtungen verwendet werden.

Die ermittelte Geräuschbelastung wird im zweiten Schritt mit den Lärmschutzziele verglichen (Konfliktanalyse). Diese Ziele können relativer oder absoluter Natur sein. Im Sinne einer Forderung, dass die Lärmbelastung nicht steigen darf, wäre festzusetzen, dass die Ausprägung des bzw. der Lärmindikatoren gegenüber dem derzeitigen Zustand nicht zunehmen dürfen. Eine andere Möglichkeit wäre, eine maximal akzeptable, absolute Geräuschbelastung zu definieren, die bis zu einem bestimmten Stichtag zu erreichen bzw. nicht mehr zu überschreiten ist. Während die Festsetzung eines relativen Ziels sich eher in einem Flughafen-Ausbaufall anbietet, wäre ein absolutes Ziel für eine allgemeine Regulierung zu präferieren, um die betroffenen Personen an allen deutschen Flughäfen gleich zu behandeln.

5.3.1.4 Regulierung der Zielerreichung

Im Falle einer absoluten Zielsetzung sind grundsätzlich drei Verhältnisse zwischen Ist- und Soll-Lärmbelastung möglich:

1. Ist \leq Soll: Es ist keine Minderungsaktion erforderlich, Fluglärm darf noch zunehmen.
2. Ist $>$ Soll: Liegt nur eine geringfügige Überschreitung vor, so kann z. B. festgesetzt werden, dass im darauf folgenden Jahr das Soll-Ziel erreicht werden muss.

3. Ist >> Soll: Ist das Ziel kurzfristig nicht erreichbar, kann z. B. festgesetzt werden, dass sich diesem schrittweise jährlich anzunähern und es mittelfristig zu erfüllen ist.

Für die Einhaltung bzw. mittelfristige Erreichung dieser Ziele wäre die Flughafengesellschaft oder die zuständige Landesluftfahrtbehörde verantwortlich.

Um steuernd auf das flughafenbezogene Gesamtkontingent einzuwirken, wird dieses in Einzelkontingente / Zertifikate gestückelt, die auf einzelne Flugbewegungen bezogen sind. Die Preise der Zertifikate können ähnlich wie die meisten Start- und Landeentgeltsysteme bemessen werden nach

- ▶ den Geräuschemissionen des Luftfahrzeugs, z. B. ICAO-Lärmkapitel, oder den jeweils verursachten Pegelwerten an Fluglärmüberwachungsanlagen, oder
- ▶ der verursachte Lärmbetroffenheit, insbesondere bezüglich der Anzahl der Personen in bestimmten Pegelklassen, Tag/Nacht-Situation (vereinfacht statistisch aus Modellberechnung abgeleitet).

Hieraus ergibt sich der „Lärmanteil“ jedes Fluges am Gesamtkontingent dieses Flughafens. Will eine Fluggesellschaft einen bestimmten Flug durchführen, muss sie das entsprechende „Lärmzertifikat“ erwerben.

Die Lärmkontingentierungen an einzelnen Flughäfen sind optimaler Weise in ein übergeordnetes Regulierungssystem eingebunden, nach dem an allen Flughäfen dieselben Lärmstandards gelten. Dadurch kann es auch zu einer aus Lärmschutzsicht positiven Umverteilung von Luftverkehrsaufkommen kommen: von Flughäfen mit erheblichen zu Flughäfen mit nur geringen Lärmproblemen (Abschnitt 5.2.1).

5.3.1.5 Handlungsmöglichkeiten der Akteure im Konfliktfall

Im Konfliktfall hat der für die Lärmkontingentierung verantwortliche Akteur insbesondere folgende Handlungsmöglichkeiten:

- ▶ Verknappung des Kontingents an erlaubten Flügen (ggf. lärm differenziert)
- ▶ Optimierung der Flugverfahren und des Bahnnutzungskonzeptes
- ▶ Betriebszeitenregelungen zur Verlagerung von Flügen in weniger lärmsensitive Tageszeiten
- ▶ Siedlungssteuerung zur Verhinderung von weiterem Zuzug in fluglärm belastete Gebiete
- ▶ Notfalls: Umsiedelung und/oder Nachtflugverbote

Die Fluggesellschaften haben insbesondere die folgenden Handlungsmöglichkeiten:

- ▶ Einsatz von lärmarmen Luftfahrzeugtypen
- ▶ Nutzung alternativer lärm mindernder Flugverfahren
- ▶ Verlagerung von Flügen vor allem von der Nacht in weniger lärmsensitive Tageszeiten
- ▶ Verlagerung von Flügen von „teuren, lauten“ zu „günstigeren, lärmarmen“ Flughäfen
- ▶ Streichung von einzelnen Flügen und Erhöhung der Auslastung der verbleibenden Flüge

Die Rechtslage zur Einführung von derartigen Lärmkontingentierungen an deutschen Flughäfen erörtert eine im Auftrag des UBA erstellte Studie des Öko-Instituts (Schütte und Brunn, 2019).

5.3.1.6 Handlungsempfehlungen

Aus Sicht des UBA ist ein übergeordnetes Konzept für einen umfassenden Schutz vor Fluglärm erforderlich, durch das gesetzte Lärmschutzziele gesichert erreicht werden. Es sollte daher an den relevanten Flughäfen für die Tagzeit von 6:00 bis 22:00 Uhr eine Lärmkontingentierung eingeführt werden und während der Nachtzeit von 22:00 bis 06:00 Uhr aus Gründen des präventiven Gesundheitsschutzes kein regulärer Flugbetrieb auf stadtnahen Flughäfen stattfinden.

Da der von der WHO empfohlene Immissionswert L_{DEN} 45 dB(A) nicht mit verhältnismäßigen Mitteln bis 2050 zu erreichen sind, sollte durch die Lärmkontingentierung in einem ersten Schritt die Einhaltung eines maximalen $L_{Aeq, Tag}$ von 63 dB(A) bis 2030 sichergestellt werden, um gravierende gesundheitliche Auswirkungen zu vermeiden, und im zweiten Schritt von 58 dB(A) bis 2050. An stadtnahen Flughäfen ist dieses Lärmschutzziel voraussichtlich nur mit einem eingeschränkten Flugbetrieb zu erreichen.

Nicht vermeidbarer Nachtflugbetrieb kann – unter Einhaltung des WHO-Zielwertes von 40 dB(A) nachts– an einem oder sehr wenigen Flughäfen stattfinden Nachtflugbetrieb, die in einem möglichst dünnbesiedelten Gebiet liegen. Welche Flughafen-Standorte hierfür geeignet wären und an welchen Standorten derzeit, sowie zukünftig angesichts der Prognosen zu viel Flugverkehr stattfindet, wird anhand einer übergeordneten, integrierten, ökologisch ausgerichteten Flughafenplanung des Bundes entschieden (Abschnitt 5.2.1).

5.3.2 Lärmmindernde Flugverfahren

5.3.2.1 Handlungsansätze und deren Wirkung

Die Art und Weise, wie Luftfahrzeuge betrieben werden, hat erheblichen Einfluss auf die Lärmbelastung der Bevölkerung, insbesondere auf welchem dreidimensionalen Pfad sich das Luftfahrzeug bewegt und in welchen Betriebszuständen es dabei befindet (Geschwindigkeit, Schub, Klappenstellungen, etc.). Verständlicherweise sind hier der Start und die Landung deutlich relevanter als der Reiseflug in großen Höhen. Die jeweils vom Luftfahrzeug einzuhaltende Betriebsweise wird – zumindest hinsichtlich des dreidimensionalen Flugpfades – durch sogenannte Flugverfahren beschrieben. Dieser Begriff ist in § 33 der Luftverkehrs-Verordnung (LuftVO)⁷⁹ definiert und weit gefasst, indem er auch Flughöhen und Meldepunkte beinhaltet. Umgangssprachlich wird auch oftmals der Begriff „Flugroute“ verwendet. In der vorliegenden Studie werden die Begriffe „Flugverfahren“ und „Flugroute“ synonym verwendet, soweit dies nicht anderes angegeben ist.

Eine Lärmminderung durch Flugverfahren kann auf verschiedene Weise erreicht werden:

1. Maßnahmen, welche zu vertikalen Veränderungen des Flugprofils führen. Ziel solcher Maßnahmen ist es, höher zu fliegen und so den Abstand zwischen der Geräuschquelle (Luftfahrzeug) und den Betroffenen zu vergrößern.
2. Maßnahmen, welche zu lateralen Veränderungen des Flugprofils führen. Hierdurch können Siedlungsgebiete insgesamt oder Siedlungsschwerpunkte bzw. besonders stark belastete Siedlungsgebiete umflogen und so die Zahl Betroffenen verringert werden.
3. Gezielte Bahn- und Routennutzung. Die gezielte Nutzung einzelner Start-/Landebahnen und ausgewählter An- und Abflugrouten können dazu beitragen, besonders sensible Siedlungs-

⁷⁹ Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894).

gebiete möglichst wenig zu überfliegen und zu bestimmten Zeiten Lärmpausen in bestimmten Regionen im Flughafenumfeld zu schaffen.

Eine Lärminderung beim Start lässt sich prinzipiell auf zwei verschiedene Arten erzielen:

1. Durch hohen Triebwerksschub und relativ steilem Steigwinkel wird möglichst schnell der Abstand zwischen der Geräuschquelle (Luftfahrzeug) und dem Immissionsort am Boden vergrößert (Steilstartverfahren).
2. Der Triebwerksschub wird während des Steigflugs zeitweilig reduziert. Dies hat eine geringere Geräuschemission, aber auch eine niedrige Flughöhe als das Steilstartverfahren zur Folge (Cut-Back-Verfahren).

In der Praxis werden Mischformen dieser beiden grundsätzlichen Möglichkeiten angewendet. Der Lärminderungseffekt der Flugverfahren hängt im Wesentlichen von den flugsicherungs-mäßigen Gegebenheiten, der Besiedlungsstruktur und der Topographie ab, sodass stets eine Einzelfallbetrachtung erforderlich ist. Speziell bei Gebieten, die sich nicht direkt unter der Flugbahn befinden, sondern seitlich versetzt liegen, machen sich Unterschiede der Flughöhe zunehmend weniger bemerkbar, sodass eine Verringerung der Triebwerksleistung hier die effizientere Methode zur Lärminderung ist. Oftmals ist die Frage nach der optimalen Lärminderung beim Abflug daher in erster Linie eine Abwägung, wie Lärm bestmöglich verteilt werden kann.

Ebenso wie beim Start lässt sich auch beim Anflug und der Landung durch Flugverfahren eine Lärminderung erreichen. Hier ist insbesondere der kontinuierliche Sinkflug (Continuous Descent Operations, CDO) zu nennen. Dabei wird die Triebwerksleistung während des Anflugs reduziert – idealerweise sinkt das Flugzeug mit Leerlaufschub – wodurch der Triebwerkslärm gemindert wird. Da aber ein kontinuierlicher Sinkflug mit erheblichen kapazitiven Einschränkungen einhergehen kann, wird dieses lärmindernde Anflugverfahren in der Regel nur in Zeiten geringer Auslastung des Flughafens angewendet. Dies sind häufig die Nachtrandstunden bzw. die Nacht.

Um auch bei hohem Verkehrsaufkommen die Luftfahrzeuge im kontinuierlichen Sinkflug landen zu lassen, wurde das Point-Merge-Verfahren entwickelt. Dieses ermöglicht eine flüssige Verkehrsabwicklung im kontinuierlichen Sinkflug durch Führung der Luftfahrzeuge auf Kreisbögen, die an einem bestimmten Sammelpunkt (Point-Merge) eingereicht werden. An dem Verkehrsflughafen Leipzig/Halle wurde das Verfahren erprobt. Beim CDO- und Point-Merge-Verfahren sind Lärmreduzierungen in einer Entfernung von ca. 18 km bis 55 km von der Landebahn möglich. Im Bereich des Endanflugs, der ca. 18 km vor der Landebahn beginnt, hat das Verfahren keinen Lärminderungseffekt, da die Luftfahrzeuge dem vorgegebenen Leitstrahl des Instrumentenlandesystems (ILS) folgen.

Durch Anhebung des Gleitwinkels des ILS können jedoch Lärminderungen in Gebieten unterhalb der Endanflugbahn erzielt werden. Diese werden aufgrund des etwas steileren Anflugwinkels in größeren Höhen überflogen. Seit 2014 wird auf der Landebahn Nordwest des Frankfurter Flughafens im Regelbetrieb der Anflug mit einem Winkel von 3,2° durchgeführt. Nach Aussagen von Fraport (Fraport AG (Fraport AG - Frankfurt Airport Services Worldwide, 2016a) konnte dadurch direkt unterhalb der Endanflugbahn eine Reduktion des Maximalschalldruckpegels von 0,5 dB(A) bis 1,5 dB(A) erreicht werden.

Mit dem Einsatz des Satellitennavigationssystems GBAS (Ground-Based Augmentation System) ergibt sich für entsprechend ausgerüstete Flugplätze und Luftfahrzeuge die Möglichkeit, Siedlungsgebiete gezielt und präziser zu umfliegen. Dafür müssen jedoch zunächst die Randbedin-

gungen von der ICAO festgelegt werden. Das Verfahren wird daher bisher nur an den Flughäfen Bremen und Frankfurt/Main in der Grundstufe CAT I für Präzisionsanflüge erprobt.

Durch die Anhebung der Zwischenanflughöhen um 1000 ft bis 3000 ft, also um ca. 300 m bis 900 m, kann die Fluglärmimmission in im Gegenanflug überflogenen Gebieten zusätzlich reduziert werden. Vor Eintritt in den Endanflug befinden sich die Luftfahrzeuge in der Regel in einem horizontalen Zwischenanflug. Dieser erfolgt überwiegend in einer Höhe von 3000 ft (916 m), am Standort Frankfurt/Main sogar in 5000 ft bzw. 6000 ft (Fraport AG (Fraport AG - Frankfurt Airport Services Worldwide, 2016a).

5.3.2.2 Festlegung von Flugverfahren

Die Festlegung der Flugverfahren erfolgt per Rechtsverordnung durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF). Flugverfahren, die von besonderer Bedeutung für den Schutz der Bevölkerung vor Fluglärm sind, werden im Benehmen mit dem UBA erlassen⁸⁰. Die fachlichen Vorarbeiten erfolgen durch die Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) nach einer Beratung durch die nach § 32b LuftVG eingerichtete örtliche Fluglärmkommission (FLK). Die Flugverfahren an den deutschen Flughäfen sind unterschiedlich stark lärmoptimiert. An vielen Flughäfen wird das verfügbare Lärminderungspotential nicht vollständig ausgeschöpft, zumal moderne Navigationstechnik noch weitere Möglichkeiten zur Lärminderung bietet. Hierzu sind weitere Maßnahmen erforderlich, die im Folgenden erläutert werden.

Systematische Lärmoptimierung aller relevanten Flugverfahren

Grundsätzlich stellt die Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmkommissionen (ADF) fest, dass eine „systematische Arbeit an der Optimierung bestehender Flugrouten / Flugverfahren ... gegenwärtig in der Bundesrepublik zufällig geschieht. [Zwar wurde z. B. am] Flughafenstandort Frankfurt ... auf Druck und Initiative der örtlichen Fluglärmkommission hin das Thema systematische Prüfung aller identifizierbarer aktiver Schallschutzmaßnahmen auf die Arbeitsagenda von DFS, Fraport und Fluggesellschaften gesetzt“ (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmkommissionen (ADF), 2013) und die erforderlichen Ressourcen hierfür bereitgestellt. An Flugplätzen, an denen der Druck aus der Öffentlichkeit nicht ausreicht, ist aber nicht gewährleistet, dass dort lärmoptimale Flugverfahren entwickelt und festgelegt werden. Sinnvoll erscheint in diesem Zusammenhang die Einrichtung der Stelle einer / eines Bundes-Fluglärmschutzbeauftragten, wie es auch die ADF vorschlägt (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmkommissionen (ADF), 2013). Zudem sollten die FLK in die Lage versetzt werden und das ausdrückliche Recht zugesprochen bekommen, fundierte Vorschläge für lärmoptimierte Flugverfahren einzubringen.

Stärkung des Lärmschutzbelanges bei der Festlegung von Flugverfahren

Im Rahmen der Festlegung von Flugverfahren im Sinne des Luftverkehrsgesetzes erfolgt eine Abwägung zwischen flugbetrieblichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sowie Lärmschutzaspekten, soweit diese nicht die Flugsicherheit betreffen. Dabei ist es aus Sicht des UBA unklar, in welchem Verhältnis kapazitätsbezogene Belange („Flüssigkeit“ des Luftverkehrs) und der Lärmschutz stehen. Das UBA empfiehlt daher, dass der Gesetzgeber hierzu klare Vorgaben macht und den Lärmschutz deutlich stärkt.

⁸⁰ § 32 Abs. 4 Nr. 8 und Abs. 4c Satz 2 LuftVG sowie § 33 der LuftVO.

Erhöhung der Verbindlichkeit von festgelegten Flugverfahren

Flugverfahren sind nicht nur ein Instrument der Verkehrsregelung für den Luftverkehr und der Kapazitätssteuerung im Luftraum, sondern sind auch ein Planungsinstrument zur Bewältigung der durch den Luftverkehr und insbesondere durch dessen Geräuschbelastungen verursachten Konflikte. Hier stellt sich für das UBA die Frage nach dem Verhältnis von aufwendig erarbeiteten und bewerteten Flugverfahren zu so genannten Einzelfreigaben (directs)⁸¹. Durch diese erhält der Luftfahrzeugführer die Erlaubnis, seinen Flug unter bestimmten Bedingungen durchzuführen, die von den allgemein festgelegten Flugverfahren abweichen. Die Einzelfreigabe hat aus Gründen der Sicherheit des Luftverkehrs Vorrang gegenüber den festgelegten Flugverfahren.

Dies soll nicht in Frage gestellt werden. Es ist jedoch problematisch, wenn sich in der Praxis des Flugbetriebs Einzelfreigaben derart häufen, dass sich zusätzliche faktische Flugrouten herausbilden. Durch eine solche Verwaltungspraxis der Flugverkehrskontrollstellen werden die Funktion und der Sinn und Zweck der rechtsstaatlich gebotenen planerischen Abwägung bei der Festlegung von Flugverfahren durch deren systematische Nichtanwendung in Frage gestellt.

Zur Lösung des Problems sollte der Gesetzgeber klarstellen, dass Einzelfreigaben nur in Ausnahmefällen zulässig sind und diese klar definieren. Ziel sollte es sein, dass zukünftig nur noch von den festgelegten Flugverfahren abgewichen werden darf, wenn dies aus Gründen der Flugsicherheit notwendig ist. Sollten sich tatsächlich sachliche Gründe ergeben, z. B. neue Möglichkeiten zur Lärmoptimierung, bestimmte Flugrouten den durch Rechtsverordnung festgelegten Flugrouten vorzuziehen, so sind diese im gesetzlich vorgeschriebenen Verfahren neu festzulegen.

Schaffung von Anreizen zur Nutzung lärmmindernder Flugverfahren

Zur Nutzung fortschrittlicher, lärmmindernder Flugverfahren ist häufig ein modernes Flugführungssystem im Luftfahrzeug und teilweise am Boden erforderlich. Luftfahrzeuge, die nicht derart ausgerüstet sind, müssen aus Lärmschutzsicht ungünstigere Flugverfahren praktizieren. Durch eine entsprechende Differenzierung der Bepreisung, z. B. über Start-/Landeentgelte oder im Rahmen einer Lärmkontingentierung, sollte deshalb ein Anreiz für die Fluggesellschaften geschaffen werden, lärmoptimierte Flugverfahren zu nutzen.

Verbesserung der Öffentlichkeitsbeteiligung und Ermittlung der Umweltauswirkungen bei der Festlegung von Flugverfahren

Im Rahmen der Änderung bzw. der Neueinführung von Flugverfahren wird nach aktuell gültiger Rechtslage die zuständige Flugsicherungsorganisation – im Allgemeinen die DFS – beauftragt, geeignete Flugverfahren zu entwerfen, die dann vom BAF geprüft und rechtsverbindlich festgelegt werden – in lärmrelevanten Fällen im Benehmen mit dem UBA. Antragsteller sind hauptsächlich Akteure der Luftverkehrsseite, wie z. B. Flughäfen, Fluggesellschaften, teilweise auch die örtlichen FLK.

Dieses Verfahren sieht derzeit weder die Beteiligung der Öffentlichkeit noch eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) vor. Dies ist auch nicht in allen Fällen erforderlich. Wenn aber die geänderten Flugverfahren erheblich nachteilige Umweltauswirkungen haben können, sollten diese mit Hilfe einer UVP ermittelt, beschrieben und bewertet werden. Die betroffene Öffentlichkeit einschließlich betroffener Verbände sollte die Möglichkeit haben, dies zu unterstützen,

⁸¹ Formal-juristisch korrekte Bezeichnung: Flugverkehrskontrollfreigabe nach § 31 LuftVO.

eigene Belange vorzutragen und einen Beitrag zu besseren Entscheidungen zu leisten (Reinhardt und Mutert, 2016). Öffentlichkeitsbeteiligung und Transparenz sind bedeutende Faktoren, um eine stärkere Berücksichtigung von Fluglärminderungspotentialen zu erreichen (Schütte et al., 2014).

Das UBA empfiehlt daher die Einführung zweier Verfahrensarten mit abgestuften Verfahrensanforderungen für die Festlegung von Flugverfahren:

- ▶ Reguläres Verfahren mit UVP
- ▶ Vereinfachtes Verfahren ohne UVP

In beiden Verfahrensarten sollen zukünftig sowohl das UBA als auch die jeweilige FLK als fester Bestandteil des Abwägungsprozesses eingebunden werden. Beim „regulären Verfahren“ entwirft die DFS mindestens zwei Flugverfahrens-Alternativen, während im „vereinfachten Verfahren“ ein bevorzugter Flugverfahrensentwurf ausreicht.

Das „reguläre Verfahren“ wird durch das BAF mit einer UVP unter Beteiligung der Öffentlichkeit durchgeführt. Es ist obligatorisch in folgenden Fallgruppen:

- ▶ Neufestsetzung von Flugverfahren nach einem Aus- oder Neubau eines Flugplatzes
- ▶ Systemänderung, d. h. wenn der Großteil der Flugverfahren an einem Flugplatz geändert wird
- ▶ Änderung eines einzelnen Flugverfahrens, wenn dieses in einer Überflughöhe über Siedlungsgebieten von unter 10.000 ft (ca. 3000 m) erfolgt

Im Übrigen wird das „reguläre Verfahren“ nur dann durchgeführt, wenn eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls nach überschlüssiger Prüfung zu dem Ergebnis kommt, dass erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen wie z. B. Geräuschbelastungen zu erwarten sind. In allen anderen Fällen ist das vereinfachte Verfahren durchzuführen.

Das „vereinfachte Verfahren“ wird angewendet, wenn die Änderung der Flugverfahren keine erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen, insbesondere Lärm, erwarten lassen, sodass kein Bedarf für die Durchführung einer UVP besteht. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Flugverfahrensänderungen im nächstgelegenen lärmsensiblen Gebiet in Überflughöhen von mindestens 10.000 ft (ca. 3000 m) stattfinden. In diesem Festlegungsverfahren muss die betroffene Bevölkerung gleichwohl umfassend und verständlich informiert werden.

5.3.3 Lärm- und schadstoffmindernde Maßnahmen in der Allgemeinen Luftfahrt

Ebenso wie bei den Strahlverkehrsflugzeugen sind auch bei propellergetriebenen Verkehrsflugzeugen und bei leichten Propellerflugzeugen in der Vergangenheit deutliche Fortschritte bei der Lärminderung erzielt worden. So weisen moderne propellergetriebene Verkehrsflugzeuge gegenüber älteren gleichschweren Flugzeugen um ca. 10 dB geringere Lärmwerte auf (European Aviation Safety Agency (EASA), 2017) (European Aviation Safety Agency (EASA), 2017).

Der Propellerlärm wird maßgeblich durch die helikale Blattspitzen-Machzahl bestimmt. Das ist die Geschwindigkeit an der Propellerblattspitze bezogen auf die Schallgeschwindigkeit. Eine Verringerung der helikalen Blattspitzen-Machzahl und damit des Propellerlärms lässt sich z. B. durch eine deutliche Reduzierung der Propellerdrehzahl verbunden mit einer geringen Vergrößerung des Propellerdurchmessers erzielen. Da hierfür die Verwendung von Getrieben oder der

Einbau neuer Flugmotoren erforderlich ist, kommt diese Möglichkeit in erster Linie bei der Entwicklung neuer, leichter Propellerflugzeuge in Betracht. Für bestehende, laute Flugzeuge mit Zweiblatt-Propellern ist dagegen eine Umrüstung auf einen kleineren Mehrblattpropeller (z. B. Vierblatt-Propeller) zweckmäßig.

Neben leichten Propellerflugzeugen verkehren an Landeplätzen häufig Hubschrauber. Auch bei Hubschraubern lässt sich durch technische Maßnahmen eine Fluglärminderung erzielen. Die Hubschraubergeräusche werden vor allem vom Triebwerk und den Hubschrauberrotoren erzeugt. Die Geräuschemission der Rotoren kann durch niedrige Blattspitzengeschwindigkeit, Verringerung der Blattbelastung und aerodynamisch günstiger Auslegung der Rotorblätter gemindert werden. Typisch für den Flugbetrieb mit Hubschraubern ist der bei bestimmten Flugmanövern – insbesondere bei Sinkflügen mit Teilleistung – oder bei hohen Fluggeschwindigkeiten auftretende Impulslärm, das so genannte „Knattern“. Dieses lässt sich durch technische Maßnahmen am Hubschrauber oder durch Vermeidung dieser Flugmanöver reduzieren.

Flugzeuge mit Kolbenmotoren fallen nicht unter die Abgasregulierungen der ICAO und haben daher nicht die Entwicklung von modernen Flugtriebwerken oder Kraftfahrzeugmotoren mitgemacht. Tabelle 11 stellt die Emissionen verschiedener Flugzeuge mit Kolbenmotor im sogenannten Start/Landezyklus der ICAO (LTO-Zyklus) dar und vergleicht diese mit den Emissionen eines modernen Pkw mit Ottomotor ab Euro 5 bei einer Fahrt über 100 km.

Tabelle 11: Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren im LTO-Zyklus

	Kraftstoff	HC		CO		NO _x		Ruß		Blei	
	[kg]	[g]	[g/kg]	[g]	[g/kg]	[g]	[g/kg]	[g]	[g/kg]	[g]	[g/kg]
Ecolight (Microlight 4-Stroke)	1,4	47	33,6	940	671	33	23,6	0,002	0,0014	0	0
Single Engine Piston Aircraft 150HP	3,2	47	14,7	2397	749	28	8,8	0,17	0,0531	2,5	0,8
Single Engine Turbo Diesel 135HP	1,6	5	3,1	19	12	30	18,8	0,09	0,0563	0	0
Single Engine Piston Aircraft 180HP	3,9	71	18,2	3930	1008	12	3,1	0,2	0,0513	3,1	0,8
Single Engine Piston Aircraft 300HP	7,5	174	23,2	7327	977	24	3,2	0,39	0,0520	6	0,8

	Kraftstoff	HC		CO		NO _x		Ruß		Blei	
Twin Engine Piston Aircraft 2 X 325HP	21,6	244	11,3	19330	895	46	2,1	1,12	0,0519	17,2	0,8

Quelle: (Rindlisbacher, 2007)

Bezüglich ihrer Gesamtemissionen spielen Flugzeuge mit Kolbenmotoren allerdings eine untergeordnete Rolle. Für die Zukunft sollte auf eine Elektrifizierung dieser vorrangig auf kurzen Strecken betriebenen Luftfahrzeuge hingewirkt werden, sodass im Jahr 2050 nur noch in Ausnahmefällen Verbrennungsmotoren bei diesen Luftfahrzeugen zum Einsatz kommen.

5.3.4 Zivile Drohnen

Immer mehr Menschen benutzen Drohnen privat wie gewerblich. Drohnen sind so genannte unbemannte Flugobjekte (unmanned aerial vehicle, UAV). Sie können sowohl autonom oder automatisiert fliegen als auch von Personen gesteuert werden. Während zu Beginn die Schwerpunkte vor allem im Bereich Foto und Video lagen, sind die Anwendungen heute wesentlich vielfältiger. In Deutschland bieten inzwischen zahlreiche gewerbliche Anwenderinnen und Anwender von Drohnen ihre professionellen Dienstleistungen auf dem Markt an. Fast die Hälfte aller Drohnenanwendungen gehört zum Bereich Kartografie und Vermessung. Weiterhin werden UAVs bei der Planung und Durchführung von Bauvorhaben sowie für die Wartung und Überprüfung der Infrastruktur eingesetzt. Dabei haben die Anwendungsmöglichkeiten ein großes Wachstumspotenzial, da immer längere Flugzeiten und größere Traglasten realisierbar werden. Die wichtigsten Anwendungsbereiche mit den größten Zuwächsen sind Einsätze im Polizei- und Rettungswesen, im Bauwesen, in der Energie- und Wasserwirtschaft sowie der Land-/Forstwirtschaft und der Vermessung. Ein breites Forschungsfeld ist zudem die Logistikbranche.

Das nationale Luftrecht unterscheidet zwischen unbemannten Luftfahrtsystemen und Flugmodellen. Gemäß § 1 des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG)⁸² handelt es sich bei unbemannten Luftfahrtsystemen um ausschließlich gewerblich genutzte Geräte (Kämper und Müller, 2017). Flugmodelle sind hingegen privat, also zum Zwecke des Sports oder der Freizeitgestaltung genutzte Geräte. Die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Nutzung von Drohnen für private und gewerbliche Zwecke sind in der 2017 in kraftgetretenen Drohnenverordnung⁸³ geregelt. Darin werden die Drohnen nach Startmasse klassifiziert. Kleinere Drohnen von 0,25 kg bis 2 kg müssen auf einer Plakette den Namen und die Adresse der Eigentümerinnen bzw. des Eigentümers ausweisen. Bei Drohnen von 2 kg bis 5 kg ist zusätzlich zu der Plakette ein Kenntnissnachweis mitzuführen. Dieser wird von einer vom Luftfahrt-Bundesamt anerkannte Stelle ausgestellt und ist fünf Jahre gültig. Für den Betrieb von Drohnen über 5 kg oder während der Nacht ist jeweils eine Einzelerlaubnis erforderlich. Diese wird von den Landesluftfahrtbehörden erteilt. Eine Ausnahme davon bilden die Bundesländer Baden-Württemberg, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt, in denen Nachtflüge mit Drohnen verboten sind. Auch ab einer Flughöhe von 100 m oder beim Flug über Wohnbebauung ist eine behördliche Ausnahmeerlaubnis einzuholen.

⁸² Luftverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 698), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 11 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808; 2018 I 472) geändert worden ist.

⁸³ Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten vom 30.03. 2017 (BGBl I S. 683; 2017).

Mit dem Inkrafttreten der Verordnung (EU) 2018/1139 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit (Amtsblatt der Europäischen Union, 2018) unterliegen unbemannte Luftfahrzeuge unabhängig von ihrem Betriebsgewicht dem Geltungsbereich dieser Luftfahrt-Grundverordnung. Es ist der Europäischen Kommission damit möglich, Durchführungsverordnungen für den Betrieb von Drohnen und Anforderungen an Technik und Personal eigenmächtig zu erlassen. Derzeit sind zwei Verordnungen verabschiedet. Sie lösen die unterschiedlichen nationalen Bestimmungen der europäischen Mitgliedsländer durch einheitliche Regeln ab.

Die Durchführungsverordnung 2019/947 (Amtsblatt der Europäischen Union, 2019b) regelt die Betriebsvorschriften für Drohnen. Die delegierte Verordnung 2019/945 (Amtsblatt der Europäischen Union, 2019a) beschreibt die Bauvorschriften bzw. Eigenschaften von Drohnen in den verschiedenen Klassen der „offenen“ Kategorie. Erstmals gibt es im Anhang zur delegierten Verordnung eine EU-einheitliche Geräuschbewertung von Drohnen. Hier wird ein Labeling des garantierten Schalleistungspegels ähnlich der „Outdoor-Richtlinie“ eingeführt (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2000). Die Ermittlung dieses Pegels soll über die EN ISO 3744:2010 mittels eines Hüllflächenverfahrens erfolgen (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011). Die Hersteller sind verpflichtet, den garantierten Schalleistungspegel auch im Rahmen der CE-Kennzeichnung zu dokumentieren. Ebenso wird in der EU-Regelung ein maximal zulässiger Schalleistungspegel angegeben. Dieser ist abhängig von der Startmasse der Drohne. Ein geeignetes Messverfahren zur Ermittlung eines reproduzierbaren garantierten Schalleistungspiegel im Rahmen der Produktzulassung liegt derzeit noch nicht vor. Die von der EU vorgesehene Anwendung der EN ISO 3744:2010 ist nur für das Hovern, das Stehen in der Luft, sinnvoll. Dieser Betriebszustand spiegelt aber nicht die Realemissionen wider, da er der geräuschärmste Betriebszustand ist. Es sind weitere Untersuchungen nötig, um ein einheitliches Messverfahren zu entwickeln, das auch die Realemissionen sachgerecht abbildet.

Durch die zunehmende Verbreitung von Drohnen können sich Personen durch den Fluglärm belästigt fühlen. Laut einer psychoakustischen Studie des amerikanischen Luft- und Raumfahrtforschungszentrums NASA (Christian und Cabell, 2017) werden Drohngeräusche störender als Autogeräusche empfunden. Für diese Studie wurden Testpersonen Aufnahmen von Drohnen in unterschiedlichen Flughöhen und Geschwindigkeiten vorgespielt, ohne zu wissen, dass es Drohngeräusche sind, und diese in Relation zu Autogeräuschen gesetzt.

Zur Verringerung der Umweltauswirkungen des Drohnenbetriebs bestehen aktuell Betriebsbeschränkungen, wie z. B. die Notwendigkeit einer Flugerlaubnis für Nachtflüge oder den beschränkten Einsatz von Drohnen in Wohngebieten. Diese Maßnahmen schützen nach Einschätzung des UBA die Bevölkerung ausreichend vor Beeinträchtigungen durch die Geräusche von Drohnen bis 2 kg. Für schwerere Drohnen sollten zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Diese ist insbesondere dann notwendig, wenn bis 2030 Paketlieferungen mit Drohnen in größerem Umfang erfolgen sollten. In diesem Fall könnte eine Betriebszeitenregelung eingeführt werden, die den Betrieb in lärmsensiblen Gebieten zu bestimmten Zeiten einschränkt. Darüber hinaus sollte generell ein Öko-Labeling für Drohnen vorgeschrieben werden, wie es bereits bei verschiedenen Produkten vorgenommen wird und nun durch die europäische Gesetzgebung vorgesehen ist. Begleitend dazu muss eine Vorschrift oder Norm zur schalltechnischen Messung erarbeitet werden, die Grundlage eines solchen Labels ist. Zusätzliche Möglichkeiten zur Lärmminimierung sind die Festsetzung einer maximalen Traglast oder die Verwendung von lärmarmen Rotorblättern und Motoren.

Eine Besonderheit sind Drohnen, die für den Personentransport vorgesehen sind. Diese so genannten Lufttaxis haben ähnliche Flugeigenschaften wie Hubschrauber und sollen auf relativ kurzen Flugstrecken eingesetzt werden. Aufgrund der Geräuschemissionen in niedrigen Flughöhen und der zukünftig möglicherweise zahlreichen Lufttaxis könnten hierdurch erhebliche Lärmbelastungen verursacht werden. Detaillierte Aussagen sind derzeit nicht möglich, da keine Studien zu den Lärmauswirkungen von Lufttaxis vorliegen. Je nach tatsächlicher Verbreitung von Lufttaxis sieht das UBA jedoch erhebliches Konfliktpotential.

5.3.5 Lärm- und schadstoffminderndes Management der Flugbetriebsflächen

5.3.5.1 Lärminderung auf dem Flughafengelände

Auch die Geräuschemissionen durch den Betrieb der Luftfahrzeuge auf dem Flughafengelände lassen sich durch verschiedene Maßnahmen vermindern. Hierzu gehört beispielsweise der Verzicht auf die Benutzung der Schubumkehr während des Landevorgangs, soweit dies aus Gründen der Flugsicherheit möglich ist.

Flugzeuge sind im Allgemeinen mit einem Hilfstriebwerk (Auxiliary Power Unit, APU) ausgerüstet. Mit der APU des Luftfahrzeugs wird an der Abstellposition Strom für das Bordnetz sowie Druckluft für die Klimaanlage und zum Starten der Triebwerke erzeugt. Der APU-Betrieb auf dem Flughafengelände sollte zur Vermeidung von Geräusch- und Schadstoffemissionen auf das flugbetrieblich unbedingt notwendige Mindestmaß eingeschränkt werden und, soweit wie möglich, durch stationäre oder mobile bodengebundene Energieversorgungssysteme ersetzt werden. Eine Vorbildfunktion kommt hier den Flughafen Hamburg zu, an dem seit Jahren der APU-Betrieb an den Parkpositionen der Luftfahrzeuge verboten ist.

Weiterhin werden auf dem Flughafengelände diverse Vorfeldfahrzeuge (Busse, Tankwagen, Flugzeugschlepper u. a.) eingesetzt. Diese Fahrzeuge sind schrittweise auf einen emissionsarmen Betrieb umzustellen. Darüber hinaus soll sowohl aus Lärmschutzgründen als auch zur Verminderung der Schadstoffbelastung das Rollen der Luftfahrzeuge auf dem Flugplatzgelände – soweit wie möglich – durch Flugzeugschlepper vorgenommen werden.

Für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten an Luftfahrzeugen werden auf dem Flughafen Triebwerksprobeläufe durchgeführt. Die Häufigkeit von Triebwerksprobeläufen hängt vor allem davon ab, ob ein Wartungs- und Instandhaltungsbetrieb am Flughafen vorhanden ist. Um einen sicheren Flugbetrieb zu gewährleisten, ist der Luftfahrzeughalter verpflichtet, in bestimmten Abständen Wartungsarbeiten am Luftfahrzeug durchführen zu lassen. Diese Wartungen reichen von Arbeiten mit geringem Umfang, die alle 250 bis 650 Flugstunden erforderlich sind, bis hin zu einer kompletten Grundüberholung alle sechs bis zehn Jahre. Die Dauer eines Probelaufes kann zwischen fünf Minuten und einer Stunde betragen, wie eine Studie im Auftrag des UBA ergeben hat (Schenk, 2009). Weiterhin zeigt diese Studie, dass für Triebwerksprobeläufe verschiedene Arten von Lärmschutzeinrichtungen bestehen:

- ▶ einfache Lärmschutzwand
- ▶ U-förmige Umrandung durch eine Lärmschutzwand
- ▶ Lärmschutzhalle vorn offen
- ▶ Lärmschutzhalle hinten offen
- ▶ Lärmschutzhalle vorn und hinten offen
- ▶ Lärmschutzhalle allseitig geschlossen

Geschlossene Lärmschutzhallen sind aerodynamisch und akustisch die beste Lösung, auch wenn Luftein- und Abgasauslässe Schalldurchlässe bilden. Lärmschutzhallen sind an den Flughäfen Hamburg, Leipzig/Halle und München vorhanden. Triebwerksprobeläufe sollten nur noch in geschlossenen Lärmschutzhallen durchgeführt werden.

5.3.5.2 Schadstoffminderung im Bodenbetrieb

Die Geräusch-, Schadstoff- und Klimagasbelastung durch das Management auf den Flugbetriebsflächen eines Flughafens kann durch die konsequente Versorgung mit Strom, klimatisierter Luft, Druckluft und die Elektrifizierung der Fahrzeuge im Bodenverkehr erheblich gemindert werden. Das führt zu einer deutlichen lokalen Minderung der Umweltbelastungen.

Das Beispiel des Flughafens München im Jahr 2016 (Schwendner und Bues, 2017) zeigt die Bedeutung verschiedener CO₂-Quellen auf dem Flughafengelände. Bezüglich der CO₂-Wirkung verursacht der Kraftstoffbedarf der Bodenfahrzeuge beispielsweise 3 % der gesamten CO₂-Emissionen am Flughafen München (inkl. Emissionen, die nicht durch den Flughafen selbst beeinflusst werden können). Davon werden 2 % durch eigene Fahrzeuge des Flughafens verursacht und 1 % durch den Kraftstoffbedarf für externe Unternehmen. Die CO₂-Emissionen von Hilfsturbinen und Triebwerksprobeläufen tragen zu 6 % der CO₂-Emissionen bei und zeigen das Potential für Minderungen auf. Dominiert werden die Emissionen jedoch vom LTO-Zyklus der Luftfahrzeuge mit 65 % der Emissionen, die sich jedoch nicht direkt vom Flughafenbetreiber beeinflussen lassen.

Durch den konsequenten Einsatz von Bodenfahrzeugen, die zukünftig elektrisch betrieben werden, ist eine Minderung dieser Klimagasemissionen in dieser Größenordnung denkbar. Die vollständige oder zumindest teilweise Elektrifizierung der Bodenfahrzeuge ist aus technischer Sicht möglich und zur Minderung von Schadstoff- und Klimabelastung eine naheliegende Option. Auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr ist die direkte Nutzung von Strom, wie sie in Elektrofahrzeugen möglich ist, sehr kosten- und energieeffizient und sollte daher auch für die Bodenfahrzeuge angestrebt werden, wenn dies technisch möglich ist. Die Nutzung nachhaltig bereitgestellter stromerzeugter Kraftstoffe ist zwar prinzipiell auch denkbar, sollte kosten- und emissionsseitig jedoch nicht vorteilhaft sein. Für viele der Bodenfahrzeuge können die standardisierten Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeuge der Fahrzeughersteller und standardisierte Lademöglichkeiten direkt eingesetzt werden. Für spezielle Flughafenanwendungen wie Hubwagen, Flugzeugschlepper, Containertransporter, fahrbare Passagiertreppen oder Liftfahrzeuge können entsprechende elektrische Fahrzeuge in Serien oder Kleinserien hergestellt werden. Da die Nutzungsprofile der Fahrzeuge oftmals gut bekannt sind, sind eine maßgeschneiderte Herstellung der Bodenfahrzeuge bezüglich der Leistungsdaten (Motorenleistungen, Akku-Kapazitäten) und die Bereitstellung der Lademöglichkeiten gut möglich. Der Einsatz entsprechender elektrischer Fahrzeuge wird aktuell im Projekt „E-PORT AN“ am Frankfurter Flughafen erprobt (Regionale Projektleitstelle Modellregion Rhein-Main, 2013). Auch am Flughafen München werden (Stand 2016) mehr als 280 Fahrzeuge und Abfertigungsgeräte mit Strom betrieben (Schwendner und Bues, 2017).

Die Klimatisierung der Flugzeuge am Boden durch vorklimatisierte Luft kann die Umweltbilanz des Fliegens deutlich beeinflussen. Nach Abschätzungen des Flughafens München können dadurch CO₂-Emissionen von jährlich 20.000 Tonnen verringert werden. Dies entspricht ca. der Hälfte der aktuell auftretenden Emissionen aus Hilfsturbinen und Triebwerksprobeläufen am dortigen Flughafen. Wird zusätzlich zur klimatisierten Luft auch Strom und ggf. notwendige weitere Druckluft während des Parkens des Flugzeuges am Boden bereitgestellt, können die Hilfstu-

rbinen ausgeschaltet bleiben und es treten durch diese keine Geräusch- und Schadstoffemissionen auf.

Die dargestellten Maßnahmen zur Verbesserung der Umweltschutzbelange auf dem Flughafengelände zeigen das Potential auf, den Luftverkehr nicht nur in der Luft, sondern auch vor Ort umweltverträglicher zu gestalten.

5.3.6 Übersicht lokaler Maßnahmen und Instrumente

In Tabelle 12 sind die Maßnahmen und Instrumente zum Umwelt- und Klimaschutz zusammenfassend aufgeführt, die auf lokaler Ebene erforderlich sind. Dabei ist jeweils der Zeitpunkt angegeben, ab denen diese spätestens wirken sollen sowie die Akteure, die diese beschließen und umsetzen sollen.

Tabelle 12: Zusammenstellung lokaler Maßnahmen und Instrumente

Maßnahmen und Instrumente	Spätester Wirkungszeitpunkt	Wer beschließt?	Wer setzt um?
Lärmkontingentierung von 6 bis 22 Uhr zur Immissionsbegrenzung auf $L_{Aeq, Tag}$ 63 dB	2030	Bund	Länder, Flughafen
Lärmkontingentierung von 6 bis 22 Uhr zur Immissionsbegrenzung auf $L_{Aeq, Tag}$ 58 dB	2050	Bund	Länder, Flughafen
Verbot des regulären Flugbetriebs von 22 bis 6 Uhr auf stadtnahen Flughäfen	2030	Bund	Länder, Flughäfen
Verlagerung von Nachtflügen an Flugplätze in dünnbesiedelten Gebieten	2050	Bund, Länder	Fluggesellschaften, Speditionen
Verbesserung der Festlegung von Flugrouten, insbesondere reguläre Umweltverträglichkeitsprüfung und Öffentlichkeitsbeteiligung	2030	Bund	Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung
Entwicklung, Nachrüstung sowie Förderung von kleineren Propellerflugzeugen hinsichtlich Lärm-, Verbrauchs- und Schadstoffminderung (inkl. Elektrifizierung)	2030	Bund, Länder	Luftfahrzeughersteller- und -betreiber
Weiterentwicklung und Anwendung technischer und flugbetrieblicher Maßnahmen zur Lärminderung bei Hubschraubern	2030	Bund, Länder	Luftfahrzeughersteller- und -betreiber
Ersatz des APU-Betriebs von Luftfahrzeugen durch bodengebundene Versorgung der Luftfahrzeuge am Flughafen	2030	Bund	Länder, Flughafen
Durchführung von Triebwerksprobeläufen nur in geschlossenen Lärmschutzhallen	2030	Bund	Länder, Flughafen
Umstellung sämtlicher Bodenfahrzeuge und Abfertigungsgeräte auf dem Flughafenvorfeld auf elektrischen Betrieb	2030	Bund	Länder, Flughäfen

6 Fazit und Ausblick

Der heutige Luftverkehr ist mit enormen Klima-, Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen verbunden und weltweit durch ein starkes Wachstum geprägt. Ein „Weiter wie bisher“ ist daher keinesfalls möglich. Der Luftverkehr muss sich an die gegenwärtigen und zukünftigen ökologischen Herausforderungen anpassen. Die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens erfordern, die durch den Menschen bedingten Treibhausgasemissionen bis Mitte dieses Jahrhunderts auf nahezu Null zu reduzieren. Neue Zielwerte der Weltgesundheitsorganisation zeigen zudem, dass die Lärmbelastungen an Flughäfen weiter reduziert werden müssen.

Das UBA legt mit dieser Studie eine Gesamtstrategie für einen umwelt- und klimaschonenden, treibhausgasneutralen sowie lärmarmen Luftverkehr der Zukunft vor. Es werden konkrete umwelt- und verkehrspolitische Ziele für die Jahre 2030 und 2050 für den Luftverkehr beschrieben und Maßnahmen zur Zielerreichung aufgezeigt. Die Strategie besteht aus acht zentralen Bausteinen:

- ▶ Baustein 1: Infrastruktur nachhaltig gestalten
- ▶ Baustein 2: Kurzstreckenflüge auf die Schiene verlagern
- ▶ Baustein 3: Klimarelevante Emissionen minimieren
- ▶ Baustein 4: Lärm reduzieren – Bevölkerung schützen
- ▶ Baustein 5: Externe Umweltkosten dem Verursacher anlasten
- ▶ Baustein 6: Für saubere Luft vor Ort sorgen
- ▶ Baustein 7: Ressourcen schonen, Rohstoffe effizient nutzen
- ▶ Baustein 8: Weniger fliegen

Nur in Kombination dieser acht Bausteine kann erreicht werden, dass der Luftverkehr im Jahr 2050 weitestgehend umwelt- und gesundheitsschonend sein wird. Die erforderliche Strategie ist somit umfassend und weitreichend. Sie ist aber auch zwingend notwendig, um eine nachhaltige Mobilität im Luftverkehr zu erreichen.

Die Strategie zeigt auf, wie es gelingt, die klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs bis 2050 substanziell zu reduzieren, Flughafenwohnende zuverlässig vor Lärm und Luftschadstoffen zu schützen, die bundesweite Luftverkehrsinfrastruktur neben ökonomischen auch unter sozialen und ökologischen Aspekten zu optimieren und ein umweltverträgliches Luftverkehrsaufkommen zu erzielen. Sie umfasst Maßnahmen und Instrumente, die auf internationaler, europäischer, nationaler und lokaler Ebene ineinandergreifen. Die Studie beschreibt konkret, welche Akteure auf welcher Ebene welche Instrumente und Maßnahmen ergreifen müssen.

Die verschiedenen Maßnahmen- und Instrumentenbündel bauen aufeinander auf, wurden aber so konzipiert, dass Deutschland und Europa für mehr Umwelt- und Klimaschutz im Luftverkehr voranschreiten können und die internationale Staatengemeinschaft später folgen kann. So wird verhindert, dass aufgrund der oftmals langwierigen Verhandlungen bei der ICAO schnelle Fortschritte beim Luftverkehr für Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschutz ausbleiben. Die Maßnahmen- und Instrumentenbündel sind zudem so konzipiert, dass sowohl Innovationen und technische Maßnahmen gefördert werden als auch über ökonomische, ordnungsrechtliche und kommunikative Instrumente Einfluss auf das Verhalten der Nachfrageseite genommen wird.

Unter derzeitigen regulatorischen und ökonomischen Bedingungen werden das Luftverkehrsaufkommen, der Energiebedarf und die damit verbundenen CO₂-Emissionen sowie die Nicht-

CO₂-Effekte des Luftverkehrs weiter ansteigen. Dies verdeutlicht die Herausforderungen, die mit dem formulierten Ziel der Treibhausgasneutralität und der Annäherung an die Klimaneutralität verbunden sind. Die Zeit drängt: Bereits heute muss der Luftverkehr Kurs auf die Pariser Klimaziele nehmen. Instrumente wie der Europäische Emissionshandel (EU-ETS) und die neue markt-basierte Klimaschutzmaßnahme der ICAO (CORSIA), die zukünftig weitgehend CO₂-neutrales Wachstum gewährleisten soll, ermöglichen zwar bereits heute mehr Klimaschutz im internationalen Luftverkehr. Von einer Reduzierung der weltweiten Netto-Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs sind wir allerdings mit der gegenwärtigen Ausgestaltung dieser Instrumente noch weit entfernt.

Der Luftverkehr verursacht heute noch erhebliche volkswirtschaftliche Umwelt- und Gesundheitskosten durch Treibhausgas-, Luftschadstoff- und Geräuschemissionen. Um diese Umwelt- und Gesundheitsschäden einerseits finanziell zu kompensieren, andererseits aber auch das Verkehrsaufkommen entsprechend den verursachten Belastungen zu steuern, müssen diese externen Kosten den Verursachern schrittweise angelastet werden.

Hinsichtlich der Klimawirkung wäre hierzu als langfristige Lösung ein globaler Emissionshandel denkbar und sinnvoll, der die Emissionen fossilen Kerosins bis 2050 schrittweise auf null reduziert. Da eine Umsetzung eines globalen Emissionshandels im Luftverkehr international derzeit schwierig realisierbar ist, schlägt diese Studie einen Instrumentenmix vor, bei dem die nationale, europäische und internationale Ebene schrittweise aktiv werden sollte. Konkret wird für den Zeitraum bis 2030 eine Kombination aus Ticketsteuer, Kerosinsteuer und EU-ETS für die nationale und europäische Ebene vorgeschlagen.

In einem ersten Schritt wird empfohlen, dass Deutschland die Einnahmedeckelung aus Luftverkehrsabgabe und Emissionshandel auf eine Mrd. Euro abschafft und die Besteuerung schrittweise deutlich erhöht. Dies hätte den Vorteil, dass Mehreinnahmen aus dem EU-ETS sowie das Verkehrswachstum nicht die Ticketsteuer senken. Damit ist eine schrittweise Erhöhung der Steuersätze möglich. Orientierungsrahmen dieser Neujustierung ist für das Umweltbundesamt die schrittweise Angleichung der fiskalischen Sockelbelastung mit anderen Verkehrsträgern. Eine volle Angleichung sollte bis spätestens 2030 sichergestellt sein. Vor diesem Hintergrund wird die absehbar weiterbestehende Befreiung internationaler Flüge von der Mehrwertsteuer künftig durch eine sukzessive Erhöhung der Luftverkehrsteuer kompensiert, während parallel ein schrittweiser Einstieg in die Kerosinbesteuerung Ungleichgewichte im Bereich der Energiebesteuerung abbaut. Die Subventionierung des Luftverkehrs durch die Mehrwertsteuerbefreiung belief sich im Jahr 2017 auf rund 4,2 Mrd. Euro. In einem ersten, kurzfristig umzusetzenden Anpassungsschritt sollte das Aufkommen der Luftverkehrsteuer durch Neujustierung der Tarifstruktur zunächst mindestens verdoppelt werden.

Außerdem sollte zunächst auf nationaler Ebene die Kerosinsteuerbefreiung aufgehoben und der EU-Mindestenergiesteuersatz von 33 Cent pro Liter eingeführt werden. Die Einführung einer Kerosinsteuer ist zwar auch auf europäischer Ebene anzustreben, hat aufgrund des Einstimmigkeitsprinzips in der Steuergesetzgebung aber kurzfristig nur geringere Umsetzungschancen. Während eine Kerosinbesteuerung in erster Linie die Besteuerung zwischen den Verkehrsträgern angleichen und damit eine umweltschädliche Subvention beseitigen soll, kann die Ticketsteuer zusätzlich als spezifisches Instrument zur Vermeidung von Kurzstreckenflügen beitragen. Beides sollte daher zeitnah auf Bundesebene umgesetzt werden.

Das UBA schlägt vor, dass Deutschland dann in einem zweiten Schritt auf europäischer Ebene aktiv wird und mit anderen europäischen Vorreiterstaaten bilaterale Verträge zur Einführung

einer Kerosinsteuer für Flüge zwischen diesen Staaten einführt. Bis 2030 soll dann eine europäische Kerosinsteuer umgesetzt sein.

Ein zentrales Instrument zur Einschränkung der Klimawirkung des Luftverkehrs ist mit dem EU-ETS bereits auf europäischer Ebene eingeführt. Damit das EU-ETS sein Potential als Klimaschutzinstrument sehr viel stärker als bislang ausspielen kann, sind allerdings weitgehende Reformschritte erforderlich. Zur Umsetzung von CORSIA in Europa ist eine Reform des EU-ETS für 2020 ohnehin vorgesehen. Deutschland sollte sich in diesem Prozess dafür einsetzen, den Emissionshandel anspruchsvoll weiterzuentwickeln und deutlich zu stärken, um das Wachstum der innereuropäischen Luftverkehrsemissionen künftig effektiv zu begrenzen. Wesentliche Elemente hierfür sind eine Beschränkung der Möglichkeit, Emissionsberechtigungen aus anderen Sektoren des EU-ETS zuzukaufen, sowie eine erweiterte Abgabeverpflichtung zur Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte. Darüber hinaus sollte das Cap deutlich verringert und der Auktionsanteil deutlich erhöht werden. Ein so reformierter EU-ETS kann damit auch wichtige Impulse für die Verlagerung des innerdeutschen Luftverkehrs auf die Schiene setzen. Die Abschaffung der Kerosinsteuerbefreiung und eine reformierte nationale Ticketsteuer flankieren den EU-ETS künftig.

Die zusätzlich generierten Einnahmen aus Ticket- und Kerosinsteuer sowie aus dem EU-ETS sollten dafür verwendet werden, den Umbau des Luftverkehrssektors hin zu mehr Nachhaltigkeit finanziell zu unterstützen. Auch wenn eine direkte Zweckbindung nicht möglich ist, schaffen die Mehreinnahmen doch Spielräume für staatliche Ausgaben, die in einen neu zu schaffenden „Innovations- oder Demonstrationsfonds Luftverkehr“ fließen sollen. Aus diesem können u. a. Investitionen für Flottenmodernisierungsprogramme, zur Entwicklung neuer umwelt- und klimafreundlicher Luftfahrzeuge und Flugverfahren (auch zum Lärmschutz) sowie in die Markteinführung nachhaltiger alternativer, postfossiler Treibstoffe, wie z. B für den Aufbau von Pilot- und Demonstrationsanlagen zur Produktion von Power-to-Liquid-Kraftstoffen (PtL), gefördert werden.

Auch CORSIA soll zukünftig dazu beitragen, einen Teil der Klimaschäden des internationalen Luftverkehrs dem Verursacher in Rechnung zu stellen und zu kompensieren. Um aber die Paris-Ziele einzuhalten und die Klimakosten vollständig zu internalisieren, muss CORSIA insbesondere durch eine anspruchsvollere Zielsetzung und stärkere Nachhaltigkeitskriterien für alternative Kraftstoffe erheblich verschärft werden. Ziel für den Zeitraum nach 2030 muss es sein, EU-ETS und CORSIA schrittweise so weiter zu entwickeln, dass ein globaler Emissionshandel im Luftverkehr etabliert wird, der in Einklang mit den Pariser Klimaschutzziele steht.

Gleichwohl sind ökonomische Instrumente alleine nicht ausreichend, um nachhaltige postfossile Treibstoffe in ausreichendem Umfang schnell genug in den Markt zu bringen, um den Luftverkehr bis 2050 treibhausgasneutral zu gestalten. Um dies zu erreichen, wird 2030 ein Anteil an nachhaltigem PtL an den in Deutschland getankten Kerosinmengen von 10 % für notwendig erachtet. Bis 2050 wird die Vermeidung von CO₂-Emissionen aber nur durch eine 100%-ige Verwendung von treibhausgasneutralen Kraftstoffen machbar sein. Da PtL selbst nach Einführung des oben beschriebenen Paketes aus Ticket- und Kerosinsteuer sowie EU-ETS bis 2030 wirtschaftlich nicht mit fossilem Kerosin konkurrieren kann, schlägt das UBA die Einführung einer europäischen Beimischquote für PtL vor. Der Bau der ersten großtechnischen PtL-Pilot- und Demonstrationsanlagen – auch an Standorten außerhalb Europas – werden über den „Innovations- oder Demonstrationsfonds Luftverkehr“ gefördert. Deutschland setzt sich auch dafür ein, dass die Einführung von PtL ebenfalls auf der internationalen, zumindest aber auf der europäischen Ebene durch Quoten unterstützt wird. Biokraftstoffe basierend auf Anbaubiomasse

sollen dabei aus ökologischen Gründen nicht in die Quote einbezogen werden. Mit Ausnahme der Nutzung eines kleinen Anteils zusätzlich anfallender biogener Rest- und Abfallstoffe, sieht das UBA in der Nutzung von Biokraftstoffen keine zielführende oder gar nachhaltige Option zur Erreichung eines treibhausgasneutralen Luftverkehrs.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Kraftstoffeffizienz – sowohl auf technischer als auch auf betrieblicher Ebene – und deren Festschreibung in weltweit gültigen Standards, sind die Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Einsatz dieser hochwertigen Kraftstoffe. Da aber auch erneuerbare Kraftstoffe weiterhin Nicht-CO₂-Effekte verursachen, ist zur Vermeidung dieser Effekte die zusätzliche Festlegung klimaoptimierte Flugrouten erforderlich.

Externe Umwelt- und Gesundheitskosten, die sich in Folge von Lärm- und Luftschadstoffbelastungen ergeben, müssen ebenfalls zukünftig internalisiert werden. Diese lokal wirksamen Umweltauswirkungen bzw. –kosten lassen sich am besten mit ökonomischen Instrumenten regulieren, die an den Start-/Landevorgang geknüpft sind, wie z.B. ambitionierte Lärm- und Luftschadstoff-abhängige Start- und Landeentgelte. Durch Besteuerung bzw. den Abbau steuerlicher Vorteile – wie sie eine Erhebung der Mehrwertsteuer auf internationale Flüge mit sich brächte – werden darüber hinaus ungerechtfertigte Wettbewerbsvorteile des Luftverkehrs gegenüber dem Schienenverkehr beseitigt, der Personen und Fracht deutlich umweltgerechter befördert. Um eine Alternative zum innerdeutschen Luftverkehr zu bieten, werden die großen deutschen Ballungszentren durch einen entsprechenden Ausbau der Schienenverkehrsinfrastruktur und Angebotsverbesserungen („Deutschland-Takt“) bis 2030 so verbunden, dass sie untereinander per Bahn in weniger als vier Stunden erreichbar sind. Dadurch wird der Bedarf an Kurzstrecken sowie Zubringerflügen stark sinken. Die Bahn wird mit vergleichbaren Reisezeiten auch im Fernverkehr zu einer attraktiven und günstigeren Alternative. Bis 2050 wird das Angebot auf der Schiene sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr verbessert, sodass Kurzstreckenflüge in Deutschland bis auf wenige Ausnahmen überflüssig werden. Ticket- und Kerosinsteuer, aber auch EU-ETS bzw. ein globaler Emissionshandel machen zudem Kurzstreckenflüge selbst im grenzüberschreitenden Luftverkehr zunehmend unattraktiv.

Eine nachhaltige Mobilität bedarf aber auch einer nachhaltig gestalteten Luftverkehrsinfrastruktur. Die bestehenden Möglichkeiten des Bundes zur Steuerung eines deutschlandweiten Flughafenetzes werden bislang nicht ausgeschöpft. Hierfür ist eine übergeordnete, nach ökologischen Kriterien ausgerichtete Bedarfsplanung des Bundes erforderlich. Diese bildet die Grundlage für ein abgestimmtes und optimiertes System von Flugplätzen, dessen Kapazitäten so genutzt werden, dass übermäßige Umweltbelastungen vermieden werden. Es wird vorgeschlagen, eine umweltorientierte Flughafenbedarfsplanung bis spätestens 2030 umzusetzen. Für diese Bedarfsplanung, also die Feststellung der maximalen „Umweltkapazität“ eines Flugplatzes, sind zunächst wissenschaftlich abgeleitete Kriterien zu entwickeln. Aufbauend auf den Ergebnissen wird ein Standortkonzept entwickelt, das als Ziel eine Konzentration auf solche Flughäfen verfolgt, die unter Berücksichtigung von ökologischen, ökonomischen und auch sozialen Kriterien von hohem allgemeinem Interesse sind. Hierzu zählt auch die Entscheidung für Flugplatzstandorte mit Nachtflugbetrieb, an denen die Bevölkerung sowie Natur und Landschaft gar nicht oder möglichst wenig belastet werden. Die Entscheidung für diese Flugplätze mit Nachtflugbetrieb in dünnbesiedelten Regionen muss bis spätestens 2030 erfolgen – einschließlich der Planung der landseitigen Verkehrsanbindung dieser Flughäfen.

Als besonders problematisch erweisen sich die durch den Luftverkehr verursachten Geräuschbelastungen. Zwar haben zahlreiche technische Innovationen zu einer Reduzierung der Ge-

räuschemissionen der einzelnen Luftfahrzeuge geführt, signifikante Entlastungen der in der Flughafenumgebung lebenden Bevölkerung konnten damit aber bisher nicht erzielt werden, weil der Luftverkehr seit vielen Jahren stark wächst. Es besteht weiterhin dringender Handlungsbedarf, um gravierende gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Lärm zu vermeiden. Daher werden in einem ersten Schritt bis 2030 an allen Flughäfen in Deutschland Lärmkontingentierungen eingeführt werden, die gewährleisten, dass die Flughafenwohnerinnen und -anwohner tagsüber im Mittel keinem Fluglärm über 63 dB(A) ausgesetzt sind. Dieser Wert ist bis 2050 auf 58 dB(A) zu verschärfen. Hierfür müssen die entsprechenden gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Während der Nachtzeit von 22:00 bis 06:00 Uhr dürfen bis spätestens 2050, möglichst aber schon deutlich vorher, keine Flüge mehr in Stadtnähe stattfinden. Unbedingt notwendiger Nachtflugbetrieb wird in Deutschland an einem oder sehr wenigen Flughäfen in dünn besiedelter Umgebung abgewickelt. Durch intermodale Kooperationen wird Fracht von und zu diesen Flughäfen bundesweit schnell auf der Schiene transportiert.

Auch die Luftqualität wird in der Flugplatzumgebung von verschiedenen Luftschadstoffen beeinträchtigt, die u. a. auf die Verbrennung von Kerosin zurückzuführen sind. Vor allem Stickoxide, aber auch Partikel und deren Vorläufersubstanzen sind ein Gesundheitsrisiko. Bisherige Studien zeigen, dass die vom Luftverkehr ausgehenden Luftschadstoffemissionen je nach Windrichtung einen nennenswerten Anteil an der zu verzeichnenden Gesamtbelastung ausmachen können. Um damit verbundene Unsicherheiten aufzulösen, bedarf es allerdings weiterer Forschung. Auch die gesundheitlichen Auswirkungen insbesondere von Ultrafeinpartikeln sind bisher nicht hinreichend geklärt und erfordern umweltepidemiologische Langzeitstudien sowie standardisierte Messmethoden. Grundsätzlich ist eine weitgehende Reduzierung der lokalen Umweltbelastungen durch Luftschadstoffe sicher zu stellen. Hierzu trägt eine „bodenseitige“ Versorgung der Luftfahrzeuge mit Strom, klimatisierter Luft und Druckluft ebenso bei wie der Einsatz von Elektrofahrzeugen auf dem Flughafengelände sowie eine landseitig verbesserte Verknüpfung des Schienen- und Luftverkehrs. Dies dient auch dem Schutz der Menschen vor Lärm.

Die Vielzahl der technischen Innovationen wird vermutlich auch bis 2050 nicht ausreichen, die Umweltprobleme des Luftverkehrs vollständig zu lösen. Solange Mensch und Umwelt von den Auswirkungen des Luftverkehrs betroffen sind, muss dieser zum Erreichen eines umweltverträglichen Maßes reguliert werden. Wie dies in einer sich immer stärker arbeitsteilig organisierenden, globalisierten Welt mit bisher wachsendem Bedarf nach Fracht- und beruflichen Luftverkehrsleistungen langfristig erfolgen kann, ist nicht zuletzt auch eine Frage der Ausgestaltung des wirtschaftlichen Handelns. Eine gute wirtschaftliche Entwicklung und ein hoher Lebensstandard erfordern nicht die Verfügbarkeit von Flugreisen an der Grenze zum Nulltarif. Vielmehr bedürfen sie eines qualitativ hochwertigen und modernen Verkehrssystems, das die Beförderung von Personen und Waren in angemessener Zeit unter Wahrung der Umweltqualitätsziele und Sozialstandards ermöglicht. Auch eine möglichst ökologische Ausgestaltung internationaler Handelsabkommen ist zukünftig zu prüfen. Zudem liegen in der Nutzung digitaler Infrastrukturen Entlastungspotenziale ebenso wie in einem Wandel der Arbeitswelt hin zur stärkeren Berücksichtigung ökologischer Aspekte.

Die vorliegende Studie zeigt einen Weg auf, von dem viele Menschen sowie das Klima und die Umwelt profitieren können. Flughafenwohnende werden entlastet, weil Lärm und Luftschadstoffe deutlich reduziert werden, Reisende profitieren von einem verbesserten Schienenverkehr. Auch auf die Luftverkehrswirtschaft werden sich verschiedene der in der Studie dargestellten Maßnahmen positiv auswirken, denn internationale Abkommen und Umweltstandards, die insbesondere für die Treibhausgas- und Klimaneutralität notwendig sind, wirken Wettbewerbsver-

zerrungen entgegen. Die angestrebten Emissionsminderungen werden zu einem Motor für Innovationen und Entwicklungen in der Industrie und lassen neue Wirtschaftszweige, z. B. zur PtL-Produktion, entstehen. Am Ende dieses Weges erbringt der Luftverkehr global seinen Klimaschutzbeitrag zur Unterschreitung der 2 ° Grad Celsius Obergrenze möglichst auf 1,5 Grad und reduziert die Auswirkungen des Klimawandels auf Mensch und Umwelt.

Doch nicht nur Art und Umfang der Maßnahmen und Instrumente sind entscheidend. Um die Erwärmung der Erde auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 Grad zu beschränken, steht nur noch wenig Zeit zur Verfügung. Daher kommt es maßgeblich darauf an, dass Deutschland und andere europäische Staaten ihrer Verantwortung gerecht werden und zügig handeln. Hierzu gehört, andere Staaten, auch außerhalb Europas, zum Handeln zu überzeugen. Der Weg zu einem umwelt- und klimaverträglichen Luftverkehr muss jetzt besritten werden.

7 Glossar

Aerosol

Ein Aerosol ist ein heterogenes Gemisch aus festen oder flüssigen Partikeln in einem Gas.

Absolute Global Warming Potential (AGWP)

Das Absolute Global Warming Potential (AGWP) eines Stoffes ist das Integral des hervorgerufenen Strahlungsantriebs über einen definierten Zeithorizont. Aufgrund sehr langer Zeithorizonte von 100 oder 500 Jahren werden auch die langlebigen Spurenstoffe wie CO₂ angemessen berücksichtigt. Viele der klimarelevanten Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs wirken nur wenige Wochen oder noch kürzer. Aus dem AGWP lässt sich das Global Warming Potential (GWP) eines Stoffes berechnen als Quotient aus dem AGWP einer Pulsemission von 1 kg dieses Stoffes und dem AGWP aufgrund einer Pulsemission von 1 kg CO₂.

Allgemeine Luftfahrt (General Aviation)

Der weit überwiegende Teil der in Deutschland zugelassenen Flugzeuge gehört zur Allgemeinen Luftfahrt, die sämtlichen zivilen Luftverkehr außer Linien- und Charterverkehr umfasst. Dies sind vor allem nichtgewerbliche Flüge mit kleineren Propellerflugzeugen oder Hubschraubern sowie Rund- und Schulungsflüge mit diesen Luftfahrzeugen.

Baseline Emissionen

Eine Schätzung der Treibhausgas-Emissionen, Speicherungen oder Entnahmen, die in einem Baseline Szenario auftreten würden.

Benchmark

Ein Benchmark ist ein für eine Anlagen- oder Produktkategorie spezifischer Emissionswert, der in Form von Emissionen pro Output-Einheit angegeben wird. Für Anlagentypen oder Branchen werden Standardwerte für die Emissionen ermittelt (z. B. nach BVT - Bester Verfügbarer Technik oder Durchschnittswerten), nach denen sich die Ausstattung mit Emissionsberechtigungen richtet.

Cap

Das Cap bezeichnet die Emissionsobergrenze oder das Emissionsziel im Emissionshandel für die nationale Ebene sowie die einzelnen Ziele für alle Makro-Sektoren (Energiewirtschaft, Industrie, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Verkehr und Haushalte). Das Gesamtziel leitet sich vom so genannten Burden Sharing ab.

Carbon offsetting

Carbon offsetting ist der englische Begriff für die Kompensation von Kohlenstoffdioxid und Treibhausgasen an anderer Stelle mit Projektgutschriften. Als freiwillige Kompensation gewinnt das Carbon offsetting zusätzlich immer mehr an Bedeutung für Private.

Clean Development Mechanism (CDM)

Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung des Kyoto Protokolls. Möglichkeiten für Staaten oder Unternehmen, mit Projekten in Entwicklungs- und Schwellenländern (ohne eigene Reduktionsverpflichtung) Emissionsgutschriften (CER) zu erwerben, die auf die eigenen Minde-rungsverpflichtungen angerechnet werden können.

CO₂-Äquivalente (CO_{2e})

Emissionen anderer Treibhausgase als CO₂ werden zur besseren Vergleichbarkeit entsprechend ihrem globalen Erwärmungspotenzial in CO₂-Äquivalente umgerechnet.

CO₂-Kompensationszertifikat

Ein Zertifikat, das erworben werden kann, um den eigenen negativen Effekt auf das Klima zu kompensieren, und das die Reduktion einer bestimmten Menge an CO₂-Emissionen an einem anderen Ort der Welt bestätigt.

CORSIA

Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) ist eine von der ICAO (Internationale Zivilluftfahrt-Organisation, eine Einrichtung der Vereinten Nationen mit 192 Mitgliedstaaten) erarbeitete globale, marktbasierende Maßnahme für den internationalen Luftverkehr, die im Juni 2018 beschlossen wurde. Sie ergänzt ein Maßnahmenpaket der ICAO zur Stabilisierung der weltweiten CO₂-Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr. Die Einführung erfolgt mit zwei für Staaten freiwilligen Phasen in den Jahren 2021 bis 2026 und der verbindlichen Teilnahme ab dem Jahr 2027.

CORSIA ist ein Offsetting- oder Kompensationssystem, d.h. es werden Daten über die Höhe verursachter Emissionen erhoben und durch Projektgutschriften („Offsets“) und Emissionsberechtigungen aus Emissionshandelssystemen („Emissionsberechtigungen“) an anderer Stelle kompensiert.

Disability Adjusted Life Year (DALY)

Das bevölkerungsbezogene Summenmaß disability-adjusted life year (DALY) stellt Gesundheitsverluste in Form verlorener gesunder Lebensjahre dar. Hierzu werden Informationen zur Mortalität (Versterben) und Morbidität (Leben mit einer Erkrankung) vereint indem years of life lost due to premature mortality (YLLs) und years lived with disability (YLDs) aufsummiert werden. Mithilfe von DALYs kann die Krankheitslast unterschiedlicher Erkrankungen und Risikofaktoren in verschiedenen Ländern und auch im Zeitverlauf verglichen werden.

Emissionen

Im Allgemeinen die Aussendung von Störfaktoren in die Umwelt. Im Luftverkehrskontext bezeichnen Emissionen die Freisetzung von Treibhausgasen oder deren Vorläufersubstanzen in die Atmosphäre, den Ausstoß von Luftschadstoffen oder das Aussenden von Schallwellen (Lärm).

Emissionshandel (Emissions Trading)

Ein marktbasierter Ansatz zum Erreichen von Zielen im Bereich des Klimaschutzes. Die europäische Emissionshandelsrichtlinie (EHL) regelt den Emissionshandel für Unternehmen in Europa seit dem 01.01.2005. Der Luftverkehr nimmt seit 2012 daran teil. Die Menge an Emissionsberechtigungen (EUA) an Anlagenbetreiber, bzw. Luftverkehrsberechtigungen an Luftfahrzeugbetreiber (EUAA) wird zugeteilt und nimmt von Periode zu Periode ab. Unternehmen, die bereits größere Anstrengungen zum Klimaschutz geleistet haben oder sich als besonders innovativ zeigen, können überschüssige Berechtigungen verkaufen. Sie haben eine zusätzliche Einnahmequelle. Reicht dagegen die zugeteilte Menge nicht aus, um die Verpflichtungen zu erfüllen, müssen zusätzliche Anstrengungen unternommen oder Emissionsberechtigungen zugekauft werden. Andernfalls wird eine Strafe fällig (finanzielle Sanktionen).

Erneuerbare Energie

Als erneuerbare Energien werden Energieträger (bspw. Wind, Sonne, Wasser) bezeichnet, die praktisch unerschöpflich zur Verfügung stehen oder sich verhältnismäßig schnell regenerieren.

Flugplatz

Der Begriff Flugplatz ist ein Obergriff für verschiedene Flugplatzarten, und zwar Flughäfen, Landeplätze und Segelfluggelände. Diese sind in der Luftverkehrs-Zulassung-Ordnung (LuftVZO) definiert.

Fossile Brennstoffe

Fossile Energieträger sind gasförmige, flüssige oder feste Brennstoffe, die in der erdgeschichtlichen Vergangenheit aus Abbauprodukten von abgestorbenen Pflanzen und Tieren entstanden sind. Zu den fossilen Brennstoffen gehören unter anderem Kohle, Öl und Erdgas.

Freight-Tonne-Kilometers (tkm)

Freight-Tonne-Kilometers oder Tonnenkilometer (tkm) ist – bezogen auf einen bestimmten Zeitabschnitt – ein Maß für die Transportleistung von Gütern. Sie bemisst sich aus dem Produkt der transportierten Masse in Tonnen (t) und der dabei zurückgelegten Wegstrecke in Kilometern (km) innerhalb dieses Zeitabschnitts.

Freiwillige Kompensation

Bei der freiwilligen Kompensation von Treibhausgasemissionen gleichen Einzelpersonen, Unternehmen oder Organisationen die bei einer bestimmten Tätigkeit freigesetzten Treibhausgase durch die finanzielle Förderung von Klimaschutzprojekten in Entwicklungs- oder Schwellenländern aus, ohne dass sie hierzu verpflichtet wären.

Globale Erwärmung

Globale Erwärmung bezeichnet eine Klimaveränderung, die durch den Anstieg der Durchschnittstemperaturen an der Erdoberfläche und der Meere hervorgerufen wird. Ursache des Temperaturanstiegs ist die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes vor allem durch den vermehrten Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid (CO₂). CO₂ wird in großem Maße bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt. Die Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre verhindert, dass Wärmestrahlungen der Erde in das Weltall entweichen können.

Kondensstreifen

Kondensstreifen sind lange und dünne künstliche Wolken, die durch Wasserdampf und Rußpartikel, die von Luftfahrzeugen emittiert werden, entstehen können. Unter bestimmten Bedingungen können sie sich relativ lang halten, ausweiten und zu künstlichen Wolken, den Zirruswolken entwickeln. Nach heutigem Stand der Wissenschaft ist davon auszugehen, dass Kondensstreifen und Zirruswolken das Klima beeinflussen.

Marktstabilitätsreserve (MSR)

Das Europäische Parlament und der Rat haben sich im Mai 2015 darauf verständigt, zum 01.01.2019 eine Marktstabilitätsreserve (MSR) einzuführen. Diese ist ein regelbasierter Mechanismus, der die hohen strukturellen Überschüsse abbauen und den EU-ETS in Phasen schwankender Nachfrage stabilisieren soll.

Postfossil

Der Begriff postfossil beschreibt die Zeit nach den fossilen Energieträgern Kohle, Erdöl und Erdgas. Zu postfossilen Kraftstoffen zählen Strom aus erneuerbaren Quellen, mit Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellte Kraftstoffe wie Power to Gas (PtG-Wasserstoff, PtG-Methan) und Power to Liquid (PtL) sowie Biokraftstoffe.

Power to Liquid (PtL)

Sammelbezeichnung für flüssige Energieträger, die aus Strom gewonnen werden. Das können synthetisch hergestelltes Benzin, Diesel, Kerosin, Ammoniak etc. sein. Gemeinsames Kennzeichen dieser Energieträger ist die Wasserelektrolyse zur Gewinnung erneuerbaren Wasserstoffs. Implizit geht das UBA vom Einsatz erneuerbaren Stroms aus, da nur dann Treibhausgasminderungen bis auf null erzielbar sind. Ebenso sollte die Kohlenstoffquelle erneuerbar sein, also atmosphärisch (inkl. biogenen Ursprungs).

Revenue Passenger Kilometers (RPK)

Revenue-Passenger-Kilometers oder Personenkilometer (Pkm) ist – bezogen auf einen bestimmten Zeitabschnitt – eine Maßeinheit für die Beförderungsleistung oder Transportleistung von Personen. Sie bemisst sich als Produkt der beförderten Personen und der dabei zurückgelegten Entfernung in Kilometern (km) innerhalb des Zeitabschnitts.

Sanktionen

Im Kyoto-Protokoll für den Emissionshandel zwischen Staaten: Höhe der Geldbußen bei Nichteinhaltung der Emissionsziele.

Im europäischen Emissionshandel für Unternehmen: Für die Phase 2005-2007 wurden 40 Euro Geldbuße pro Tonne ungedeckter CO₂-Emissionen erhoben, ab 2008 sind es 100 Euro pro Tonne, seit 2013 indexiert gemäß dem Kaufkraftindex. Die „verpasste“ Emissionsminderung muss im folgenden Jahr zusätzlich mit Emissionsberechtigungen erbracht werden.

Standard and Recommended Practices (SARPs)

Standard and Recommended Practices (SARPs) sind Grundsatzdokumente, die als Anhang zum Chicagoer Abkommen (Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt vom 07.12.1944) der ICAO in Beschlussform erstellt und veröffentlicht werden. Die über einen strukturierten und mehrstufigen Prozess erarbeiteten Dokumente bilden die Basis für die weltweite Standardisierung der Funktions- und Durchführungsanordnungen im internationalen Luftverkehr. Die ICAO verwaltet derzeit etwa 12.000 SARPs Dokumente.

Strahlungsantrieb

Die Klimawirksamkeit von bestimmten Emissionen, also die Änderung der Energiebilanz des Systems Erde. Von besonderer Relevanz für Flugemissionen in Reiseflughöhe, da der Strahlungsantrieb hier stärker ist als bei Emissionen an der Erdoberfläche.

Treibhauseffekt

Als Treibhauseffekt bezeichnet man die Erderwärmung durch Treibhausgase in der Atmosphäre. Diese in der Atmosphäre angesammelten Treibhausgase verhindern die Wärmerückstrahlung von der Erdoberfläche ins All. Neben dem natürlichen gibt es den so genannten anthropogenen Treibhauseffekt. Dieser wird vom Menschen durch den vermehrten Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase hervorgerufen. Durch die industrialisierte Welt erhöht sich der Anteil der Spu-

rengase, sodass es zu einer überdurchschnittlichen Erwärmung, dem so genannten Klimawandel kommt.

Zu den Treibhausgasen zählen Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), halogenisierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW und P-FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆).

Verkehrsleistung

Als Verkehrsleistung wird das Produkt aus Verkehrsmenge (z. B. die Summe aller Güter oder Personen) und seiner zurückgelegter Strecke (s) pro Zeit (t) definiert. Einheiten der Verkehrsleistungen sind unter anderem tkm/Jahr im Frachtverkehr, Pkm/Jahr im Personenverkehr.

Weltgesundheitsorganisation (WHO)

Die Weltgesundheitsorganisation ist die Koordinationsbehörde der Vereinten Nationen für das internationale öffentliche Gesundheitswesen.

Zirruswolken

Zirruswolken stellen eine lockere Ansammlung von Eiskristallen dar und treten meist in schmalen Bändern auf. Nach heutigem Stand der Wissenschaft ist davon auszugehen, dass von Luftfahrzeugen hervorgerufene Zirruswolken das Klima beeinflussen.

8 Quellenverzeichnis

- AIRBERLIN 2016. Geschäftsbericht 2015. London.
- AIRBUS 2015. Aircraft Noise – Technologies and operations.
- AIRBUS 2018. Global networks, global citizens: global market forecast; 2018-2037. Blagnac Cedex.
- AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL EUROPE (ACI EUROPE). 2019. *European air passenger traffic 2018* [Online]. Available: <http://www.airport-business.com/2019/02/european-air-passenger-traffic-6-1-2018/> [Accessed 09.08.2019].
- ALLEN, M., DE CONNINCK, H., DUBE, O. P., HOEGH-GULDBERG, O., JACOB, D., JIANG, K., REVI, A., ROGELJ, J., ROY, J., SHINDELL, D., SOLECKI, W., TAYLOR, M., TSCHAKERT, P. & WAISMAN, H. 2018. Special Report on Global warming of 1.5°C. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (ed.). Genf.
- AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION 2018. VERORDNUNG (EU) 2018/1139 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 4. Juli 2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit sowie zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 2111/2005, (EG) Nr. 1008/2008, (EU) Nr. 996/2010, (EU) Nr. 376/2014 und der Richtlinien 2014/30/EU und 2014/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 552/2004 und (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EWG) Nr. 3922/91 des Rates. Europäische Union,.
- AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION 2019a. DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2019/945 DER KOMMISSION vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme. Europäische Union,.
- AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION 2019b. DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2019/947 DER KOMMISSION vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge. Europäische Union,.
- ANASTASIA KHARINA, TIM MACDONALD & RUTHERFORD, D. 2018. Environmental performance of emerging supersonic transport aircraft. The International Council on clean Transportation (ICCT).
- ANDERSON, H. R., FAVARATO, G. & ATKINSON, R. W. 2013. Long-term exposure to air pollution and the incidence of asthma: meta-analysis of cohort studies. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6, 47-56.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER FLUGLÄRMKOMMISSIONEN (ADF), H. 2013. Das 10-Punkte-Programm der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmkommissionen: Initiative zur Erreichung verbesserten Schutzes vor Fluglärm. o. O.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN (ADV). 1991. *ADV-Verkehrsstatistik 1991* [Online]. Berlin. Available: https://adv.aero/wp-content/uploads/2016/03/Statistik_1991.pdf [Accessed 02. November 2018].
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN (ADV) 2018. ADV-Monatsstatistik 12/2018.
- ARNOLD, K., KOBIELA, G. & PASTOWSKI, A. 2017. Technologiebericht 4.3 Power-to-liquids/-chemicals innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. In: WUPPERTAL INSTITUT, I., IZES,, (ed.) *Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. Wuppertal.
- ATKINSON, R. W., BUTLAND, B. K., ANDERSON, H. R. & MAYNARD, R. L. 2018. Long-term Concentrations of Nitrogen Dioxide and Mortality: A Meta-analysis of Cohort Studies. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 29, 460-472.
- BALZER, S. 2005. FFH, Vogelschutzrichtlinie, NATURA 2000: Konflikte mit dem Luftsport? *Vogel und Luftverkehr*, 25, 24-33.
- BASNER, M. & MCGUIRE, S. 2018. WHO environmental Noise Guidelines for the European Region: a systematic review on environmental noise and effects on sleep. *International journal of environmental research and public health*, 15, 519-564.
- BEUTEL, M. E., JÜNGER, C., KLEIN, E. M., WILD, P., LACKNER, K. J., BLETTNER, M., BINDER, H., MICHAL, M., WILTINK, J., BRÄHLER, E. & MÜNZEL, T. 2016. Noise annoyance is associated with depression and anxiety in the general population- the contribution of aircraft noise. *Public Library of Science*, 11.
- BIRMILI, W., SÜRING, K., BECKER, K., GERWIG, H., SCHWIRN, K., LÖSCHAU, G., PLASS, D. & TOBOLLIK, M. 2018. Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – aktueller Wissensstand Ultrafine particles in ambient air – current state of knowledge. *Umwelt und Mensch, Informationsdienst*.

- BOCK, L. & BURKHARDT, U. 2019. Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 8163-8174.
- BOEING, H. 2018. Commercial market outlook 2018-2037. Chicago.
- BÖLKE, M. 2016. Leitlinien für umweltverträgliche Dienstreisen im Umweltbundesamt. In: DEUTSCHLAND. UMWELTBUNDESAMT (ed.). Dessau-Roßlau.
- BOWE, B., XIE, Y., LI, T., YAN, Y., XIAN, H. & AL-ALY, Z. 2018. The 2016 global and national burdens of diabetes mellitus attributable to PM_{2.5} air pollution. *The Lancet Planetary Health*, 2, e301-e312.
- BRACHER, T., HANDKE, G., LEHMBROCK, M. & TOMERIUS, S. 2003. Klimaschutz und Dienstreisekosten – Wege zur Umweltentlastung und Kostenersparnis. Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik.
- BRINKMANN, R., BIEDERMANN, M., BONTADINA, F., DIETZ, M., HINTEMANN, G., KARST, I., SCHMIDT, C., SCHORCHT, W., EIDAM, T. & LINDNER, M. 2012. Planung und Gestaltung von Querungshilfen für Fledermäuse: eine Arbeitshilfe für Straßenbauvorhaben im Freistaat Sachsen. In: SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, A. U. V. (ed.). Dresden.
- BRINNER, A., SCHMIDT, M., SCHWARZ, S., WAGENER, L. & ZUBERBÜHLER, U. 2018. Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. In: WUPPERTAL INST. FÜR KLIMA, U., ENERGIE, (ed.) *Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. Wuppertal.
- BRUDERER, B. & KOMENDA-ZEHNDER, S. 2005. Einfluss des Flugverkehrs auf die Avifauna: Schlussbericht mit Empfehlungen. *Schriftenreihe Umwelt: Natur und Landschaft*. Bern: Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN 2017. Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 2015 bis 2018. Bundesregierung der 18. Legislaturperiode.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, N. U. R., BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ & BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, H. 2017. Nationales Programm für nachhaltigen Konsum: gesellschaftlicher Wandel durch einen nachhaltigen Lebensstil. Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, B. U. S. 2009. Flughafenkonzept der Bundesregierung 2009. Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR 2018. Zielfahrplan Deutschland-Takt Vorstellung des ersten Gutachterentwurfs im Rahmen des Zukunftsbündnisses Schiene.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, H. 2017. Luftverkehrskonzept des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin.
- BURGER, L. 2018. Strukturen der Passagiernachfrage an deutschen Verkehrsflughäfen - Eine Abschätzung auf Grundlage unterschiedlicher Daten- und Informationsquellen. Karlsruher Institut für Technologie.
- BURKHARDT, U. & KÄRCHER, B. 2011. Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change*, 1, 54-58.
- BUTLER, J. H. & MONTZKA, S. A. 2018. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)* [Online]. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/aggi.html> [Accessed 01. März 2019].
- BVU/INTRAPLAN, SCHUBERT, D.-I. M., KLUTH, D.-M. O. T., NEBAUER, D.-G. G., RATZENBERGER, D.-K. R., GMBH), I. C., KOTZAGIORGIS, D.-V. S., BUTZ, D.-M. B., SCHNEIDER, D.-M. W., LEIBLE, T. D.-V. M. & GMBH), B. B. V. U. 2014. Verflechtungsprognose 2030 Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs. Schlussbericht. *Forschungsbericht*. Deutschland. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- CAMES, M., GRAICHEN, P., KASTEN, P., MOTTSCHALL, M., FABER, J., NELISSEN, D., SCHEELHAASE, J., GRIMME, W. & MAERTENS, S. 2019. Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr: Strategiepapier Luftfahrt. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Druck. Dessau-Rosslau: Deutschland. Umweltbundesamt.
- CDU, C. U. S., HRS.G.; 2018. Ein neuer Aufbruch für Europa; Eine neue Dynamik für Deutschland; Ein neuer Zusammenhalt für unser Land: Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD; 19. Legislaturperiode. In: CHRISTLICH-DEMOKRATISCHE UNION DEUTSCHLANDS, CHRISTLICH-SOZIALE UNION IN BAYERN & SOZIALDEMOKRATISCHE PARTEI DEUTSCHLANDS (eds.). Berlin.
- CHRISTIAN, A. & CABELL, R. Initial investigation into the psychoacoustic properties of small unmanned aerial system noise. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 05. - 09. Juni 2017 2017 Denver. [21].

- CLARK, C., HEAD, J. A. & STANSFELD, S. A. 2013. Longitudinal effects of aircraft noise exposure on children's health and cognition: a six-year follow-up of the UK RANCH cohort. *Journal of Environmental Psychology*, 35, 1-9.
- CLARK, C. & PAUNOVIC, K. 2018. WHO environmental Noise Guidelines for the European Region: a systematic review on environmental noise and cognition. *International journal of environmental research and public health*, 15.
- CLIFFORD, A., LANG, L., CHEN, R., ANSTEY, K. J. & SEATON, A. 2016. Exposure to air pollution and cognitive functioning across the life course – A systematic literature review. *Environmental Research*, 147, 383-398.
- COHEN, S. A., HIGHAM, J. E. S. & CAVALIERE, C. T. 2011. Binge flying. Behavioural addiction and climate change. *Annals of Tourism Research*, 38, 1070-1089.
- DAHLMANN, K., GREWE, V. & NIKLAß, M. 2019. Integration of Non-CO2 Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA - Workpackage: Suitable climate metrics for assessing the relation of non-CO2 und CO2 climate effects Dessau-Roßlau: Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V.
- DEUTSCHE EMISSIONSHANDELSSTELLE (DEHST) IM UMWELTBUNDESAMT, H. 2017. Klimaneutrale Dienstreisen der Bundesregierung: Hintergrundpapier. Berlin.
- DEUTSCHE LUFTHANSA 2016. Balance: das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit in der Lufthansa Group. Köln.
- DEUTSCHE LUFTHANSA 2017. Geschäftsbericht 2016. Köln.
- DEUTSCHER BUNDESTAG 2014. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sabine Leidig, Herbert Behrens, Karin Binder, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 18/1133 – Potenzial der Verlagerung von Flügen auf die Bahn am Flughafen Frankfurt am Main. Berlin.
- DEUTSCHER BUNDESTAG 2018. Kleine Anfrage der Abgeordneten Jörg Cezanne, Dr. Gesine Löttsch, Lorenz Gösta Beutin, Christine Buchholz, Heidrun Bluhm, Kerstin Kassner, Dr. Achim Kessler, Caren Lay, Sabine Leidig, Ralph Lenkert, Michael Leutert, Amira Mohamed Ali, Victor Perli, Ingrid Remmers, Dr. Kirsten Tackmann, Andreas Wagner, Hubertus Zebel und der Fraktion DIE LINKE: Potenzial der Verlagerung von Inlandsflügen auf die Bahn am Flughafen Frankfurt; Drucksache 19/4784. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) 2011. Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3744:2010
- DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR). 2004. *Das Projekt Leiser Flugverkehr - LFKV: ein interdisziplinäres Projekt der Vorsorgeforschung im HGF-Verbund* [Online]. Göttingen. Available: http://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-192/402_read-11273 [Accessed 13. April 2017].
- DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR). 2015a. *Mit Hochdruck gegen Fluglärm: Druckluft mindert Triebwerksgeräusche deutlich* [Online]. Göttingen. Available: http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10204/296_read-12869/#/gallery/18779 [Accessed 13. April 2017].
- DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR). 2015b. *Prognose 2030: Über 70 Millionen zusätzliche Flugpassagiere in Deutschland* [Online]. Available: https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-16247/year-2015/#/gallery/21491 [Accessed 26. Oktober 2018].
- DEVRIES, R., KRIEBEL, D. & SAMA, S. 2017. Outdoor Air Pollution and COPD-Related Emergency Department Visits, Hospital Admissions, and Mortality: A Meta-Analysis. *COPD: Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 14, 113-121.
- DICKINSON, J. E., LUMSDON, L. M. & ROBBINS, D. K. 2011. Slow travel: Issues for tourism and climate change. *Journal of Sustainable Tourism*, 19, 281-300.
- DOMINONI, D. M., GREIF, S., NEMETH, E. & BRUMM, H. 2016. Airport noise predicts song timing of European birds. *Ecology and Evolution*, 6, 6151-6159.
- ERIKSSON, C., HILDING, A., PYKO, A., BLUHM, G. L., PERSHAGEN, G. & ÖSTENSON, C.-G. 2014. Long-term aircraft noise exposure and body mass index, waist circumference, and type 2 diabetes: a prospective study. *Environmental health perspectives*, 122, 687-694.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND EUROPÄISCHER RAT 2000. Richtlinie 2000/14/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2000 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der

- Mitgliedstaaten über umweltbelastende Geräuschemissionen von zur Verwendung im Freien vorgesehenen Geräten und Maschinen.
- EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). 2017. *EASA approved noise levels* [Online]. Köln. Available: <https://www.easa.europa.eu/document-library/noise-type-certificates-approved-noise-levels#group-easa-downloads> [Accessed 19. April 2017].
- EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA) & EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) 2016. European aviation environmental report. Luxembourg.
- EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA), EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) & EUROCONTROL 2019. European Aviation Environmental Report 2019. Köln.
- EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION (EUROCONTROL), H. 2013. Challenges of Growth 2013: Task 7: European Air Traffic in 2050. Brüssel.
- FAULSTICH, M., HOLM-MÜLLER, K., BRADKE, H., CALLIESS, C., FOTH, H., NIEKISCH, M. & SCHREURS, M. 2014. Fluglärm reduzieren: Reformbedarf bei der Planung von Flughäfen und Flugrouten: Sondergutachten; Hausdruck. Berlin: Rat von Sachverständigen für Umweltfragen,.
- FEHRENBACH, H., GIEGRICH, J., KÖPPEN, S. & HOFMEIER, K. 2019. *BioRest : Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor) ; Abschlussbericht*, Heidelberg, Saarbrücken, Darmstadt, Dessau-Roßlau.
- FILIPPONE, A. 2012. *Advanced aircraft flight performance*, Cambridge, Cambridge University Press,.
- FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT URLAUB UND REISEN E.V (FUR), H. 2018. Reiseanalyse 2018: Erste ausgewählte Ergebnisse der 48. Reiseanalyse zur ITB 2018. Kiel.
- FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT URLAUB UND REISEN E.V. 2018. Reiseanalyse 2018: Erste ausgewählte Ergebnisse der 48. Reiseanalyse zur ITB 2018. Kiel.
- FRAPORT AG - FRANKFURT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE, H. 2008. Umweltbericht: Umwelterklärung 2008 mit Umweltprogramm bis 2011 für den Standort Flughafen Frankfurt Main. *Spektrum Umwelt*. Frankfurt a.M.
- FRAPORT AG - FRANKFURT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE, H. 2011. Umwelterklärung 2011: mit Umweltprogramm bis 2014 für die Organisationen Fraport AG, N*ICE und FCS am Flughafen Frankfurt. Frankfurt a.M.
- FRAPORT AG - FRANKFURT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE, H. 2016a. Aktive Schallschutzmaßnahmen: höher fliegen. In: FRAPORT AG - FRANKFURT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE (ed.). Frankfurt a.M.
- FRAPORT AG - FRANKFURT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE, H. 2016b. Aktive Schallschutzmaßnahmen: leiser fliegen. Frankfurt a.M.
- FRAPORT AG - FRANKFURT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE, H. 2018. *Lufthygienischer Jahresbericht 2018* [Online]. Frankfurt a.M. Available: https://www.fraport.de/de/misc/binaer/unternehmen/verantwortung/publikationen/umwelt/lufthygiene-jahresberichte/lufthygienischer-jahresbericht-2018/_jcr_content.file/jb_2018.pdf [Accessed].
- FRENZ, W. & MÜGGENBORG, H.-J. 2017. Ballonfahrten über einem Naturschutzgebiet: Habitat- und Artenschutz. *Natur und Recht*, 1-5.
- GARNIEL, A., DAUNICHT, W., OJOWSKI, U., MIERWALD, U., BREDEMEIER, B., DIEKMANN, B., EISCHEID, I. & WIGGERSHAUS, A. 2007. Vögel und Verkehrslärm: Schlussbericht; Langfassung. Bonn: Deutschland. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- GARNIEL, A. & MIERWALD, U. 2010. Arbeitshilfe Vögel und Straßenverkehr. Bonn: Deutschland. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- GEMEINNÜTZIGE UMWELTHAUS GMBH. 2019. *Was ist der Frankfurter Fluglärmindex (FFI)?* [Online]. Kelsterbach. [Accessed 08. März 2019].
- GERMANN MOLZ, J. 2009. Representing pace in tourism mobilities: Staycations, slow travel and the amazing race. *Journal of Tourism and Cultural Change*, 7, 270-286.
- GIL, D., HONARMAND, M., PASCUAL, J., PÉREZ MENA, E. E. & MACÍAS GARCIA, C. 2015. Birds living near airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise. *Behavioral Ecology*, 26, 435-443.
- GOSSLING, S. 2011. *Carbon management in tourism: mitigating the impacts on climate change*, New York, Routledge,.
- GÖTZ, M., SCHALLER, S., WOLTER, S., BÖTHER, S. & GATHER, C. 2018. *Freiwillige CO2-Kompensation durch Klimaschutzprojekte*, Dessau-Roßlau.

- GREISER, C. & GREISER, E. 2014. Umgebungslärm und Gesundheit am Beispiel Bremen. Musweiler ; Dessau-Roßlau: Epi.Consult GmbH; Deutschland. Umweltbundesamt.
- GREWE, V., STENKE, A., PONATER, M., SAUSEN, R., PITARI, G., IACHETTI, D., ROGERS, H. L., DESSENS, O., PYLE, J. A., ISAKSEN, I. S. A., GULSTAD, L., SØVDE, O. A., MARIZY, C. & PASCUILLO, E. 2007. Climate impact of supersonic air traffic: An approach to optimize a potential future supersonic fleet - Results from the EU-project SCENIC. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 5129-5145.
- GUARNIERI, M. & BALMES, J. R. 2014. Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet*, 383, 1581-1592.
- GUSKI, R. & SCHRECKENBERG, D. 2015. Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld: Gesamtbetrachtung des Forschungsprojekts NORAH. In: GEMEINNÜTZIGE UMWELTHAUS GMBH (ed.) *NORAH: Noise-related annoyance, cognition, and health*. Kelsterbach.
- GUSKI, R., SCHRECKENBERG, D. & SCHUEMER, R. The WHO evidence review on noise annoyance 2000 – 2014. INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, August 21, 2016 2016 Hamburg. 2564-2570.
- GUSKI, R., SCHRECKENBERG, D. & SCHUEMER, R. 2017. WHO environmental Noise Guidelines for the European Region: a systematic review on environmental noise and annoyance. *International journal of environmental research and public health*, 14, 1539-1580.
- HAMRA, G. B., GUHA, N., COHEN, A., LADEN, F., RAASCHOU-NIELSEN, O., SAMET, J. M., VINEIS, P., FORASTIERE, F., SALDIVA, P., YORIFUJI, T. & LOOMIS, D. 2014. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Environmental health perspectives*, 122, 906-911.
- HEALTH EFFECTS INSTITUTE, H. 2013. Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles: HEI Review Panel on Ultrafine Particles. *HEI Perspectives*. Boston.
- HELMREICH, S., BONILLA, D., AKYELKEN, N., DÜH, J. & WEISS, L. 2010. Deliverable 7.1: Recommendation of a vision 2050 and action plans for European policy and European Key demonstration projects *Freightvision – Vision and Action Plans for European Freight Transport until 2050* Wien: European Commission.
- HENKE, R., DE GROOT, R. & WACHENHEIM, M. 2017. Strategic research and innovation agenda: delivering Europe's vision for aviation; 2017 Update. In: ACARE: ADVISORY COUNCIL FOR AVIATION RESEARCH AND INNOVATION IN EUROPE (ed.). s. I.
- HERMANN, H., EMELE, L., JÖRß, W., BLANCK, R., LUDIG, S., LORECK, C., FÖRSTER, H., SCHEFFLER, M., GREINER, B., SCHUMACHER, K., HARTHAN, R. O., WIEGMANN, K., HENNEBERG, K., BRAUNGARDT, S., KOCKAT, J., EICHHAMMER, W., PFLUGER, B., ELSLAND, R., SCHADE, W., FLEITER, T., SCHLOMANN, B., HARTWIG, J., SENSFUß, F. & ZIESING, H.-J. 2015. Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.
- HESSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, E., VERKEHR UND WOHNEN ABTEILUNG LANDESENTWICKLUNG, ENERGIE, 2007. Verordnung über die Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000" vom 22.06.07, GVBl. I S. 406 in der Fassung der Berichtigung vom 20.09.07, GVBl. I S.578. Wiesbaden.
- HIESTER, U., LUDWIG, F., JOSWIG, P. & FELGNER, A. 2019. Wissenschaftliche Erkenntnisse zu Rückständen / Ablagerungen von Kerosin nach sogenanntem Fuel Dumping und zu Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit. In: GMBH, R. (ed.).
- HILD, J. & MORGENROTH, K. 2004. Die Bedeutung von Biotopstruktur und Vegetation für die Verhütung von Vogelschlägen im Bereich des Flughafens Friedrichshafen. *Vogel und Luftverkehr*, 24, 13-25.
- HORNBERG, C., NIEKISCH, M., CALLIESS, C., KEMFERT, C., LUCHT, W., MESSARI-BECKER, L. & SUSANNE, R. V. 2018. Sondergutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen: Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor; Unterrichtung durch die Bundesregierung. In: DEUTSCHER BUNDESTAG (ed.) *Drucksache*. Berlin.
- HORNUNG, M., ISIKVEREN, A. T., COLE, M. & SIZMANN, A. Ce-Liner - Case Study for eMobility in Air Transportation. 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2013.
- HUSEMANN, M., SCHÜLTKE, F., AIGNER, B., STUMPF, E. & SCHÄFER, K. 2019. Zusammenfassende Darstellung der Möglichkeiten zur Reduzierung des zukünftigen Klimabeitrags des Flugverkehrs durch klimaoptimiertes Flugzeugdesign. In Druck. Dessau-Rosslau: Deutschland. Umweltbundesamt.
- INSTITUT FÜR LANDES- UND STADTENTWICKLUNGSFORSCHUNG, H. 2018. *Mobilitätsmanagement Definition* [Online]. Available: <http://www.mobilitaetsmanagement.nrw.de/mobilitaetsmanagement/definition> [Accessed 17. April 2018].

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) 1999. Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of IPCC Working Groups I and III. Genf.
- INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION 2018. Mid-year Report 2018.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO) 2014. *Annex 16 to the convention on international civil aviation: environmental protection*, Montreal.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO) 2017a. Aviation benefits. Montreal.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO) 2018a. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) - Frequently Asked Questions. International Civil Aviation Organization,.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), H. 2008. Environmental Protection: Annex 16 to the convention on international civil aviation; Volume II: Aircraft engine emissions. Dritte Auflage ed. Montreal.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), H. 2009. ICAO's policies on charges for airports and air navigation services. Eighth Edition ed. Montréal.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), H. 2017b. Environmental Protection: Annex 16 to the convention on international civil aviation; Volume III: Aeroplane CO2 emissions. In: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ed.). Montreal.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), H. 2018b. Environmental Protection: Annex 16 to the convention on international civil aviation; Volume IV: Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA). In: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ed.). Montreal.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), H. 2019. *Passenger traffic growth and moderate air cargo demand in 2018* [Online]. Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Solid-passenger-traffic-growth-and-moderate-air-cargo-demand-in-2018.aspx> [Accessed 09.08.2019].
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, H. 2017. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) 2018. Oil Information 2018. Paris.
- JANßEN, A., BÄNFER, D., HALFTER, A. & BÖLKE, M. 2018. Mobilitätsumfrage des Umweltbundesamtes 2017 : Kurzbericht. *Texte / Umweltbundesamt*. Stand: Mai 2018 ed. Dessau-Roßlau.
- JERING, A., KLATT, A., SEVEN, J., EHLERS, K., GÜNTHER, J., OSTERMEIER, A. & MÖNCH, L. 2013. Globale Landflächen und Biomasse: nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. In: DEUTSCHLAND. UMWELTBUNDESAMT (ed.) *Positionen*. Dessau-Rosslau.
- JÖDICKE, K., LEMKE, H. & MERCKER, M. 2018. Wirksamkeit von Vogelschutzmarkierungen an Erdseilen von Höchstspannungsfreileitungen: Ermittlung von artspezifischen Kollisionsraten und Reduktionswerten in Schleswig-Holstein. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 50, 286-294.
- KALTENBACH, M., MASCHKE, C., HEß, F., NIEMANN, H. & FÜHR, M. 2016. Health impairments, annoyance and learning disorders caused by aircraft noise: synopsis of the state of current noise research. *International Journal of Environmental Protection*, 6, 15-46.
- KÄMPER, N. & MÜLLER, K. I. 2017. Rechtliche Rahmenbedingungen für den Betrieb von Drohnen. *Umwelt- und Planungsrecht*, 37, 401-406.
- KIOUMOURTZOGLOU, M.-A., SCHWARTZ, J. D., WEISSKOPF, M. G., MELLY, S. J., WANG, Y., DOMINICI, F. & ZANOBETTI, A. 2016. Long-term PM2.5 Exposure and Neurological Hospital Admissions in the Northeastern United States. *Environmental health perspectives*, 124, 23-29.
- KLAGES, A., NIEDEGGEN, B. & PÜTSCH, M. 2010. Biologische Vielfalt und Sport - Neue Impulse für die Partnerschaft von Naturschutz und Sport. *Natur und Landschaft*, 85, 419-424.
- KLATTE, M., BERGSTRÖM, K., SPILSKI, J., MAYERL, J. & MEIS, M. 2014. Wirkungen chronischer Fluglärmbelastung auf kognitive Leistungen und Lebensqualität bei Grundschulkindern. In: GEMEINNÜTZIGE UMWELTHAUS GMBH (ed.) *NORAH: Noise-related annoyance, cognition, and health*. Kelsterbach.
- KLEINHÜCKELKOTTEN, S., MOSER, S. & NEITZKE, H.-P. 2016. *Repräsentative Erhebung von Pro-Kopf-Verbräuchen natürlicher Ressourcen in Deutschland (nach Bevölkerungsgruppen)*, Hannover [u.a.].
- KLIMAKTIV. 2019. *Der UBA-CO2-Rechner* [Online]. Tübingen. Available: http://www.uba.co2-rechner.de/de_DE/ [Accessed 8. Oktober 2019].
- KNÖRR, W., SCHACHT, A., GORES, S., KOTZULLA, M. & WETZEL, F. 2012. *Entwicklung eines eigenständigen Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs - (TREMODO-AV)*, Dessau-Roßlau.

- KÖCK, W., BOVET, J. & FISCHER, H. 2017. Das Instrument der Bedarfsplanung - Rechtliche Möglichkeiten für und verfahrensrechtliche Anforderungen an ein Instrument für mehr Umweltschutz. Dessau-Roßlau.
- KÖDER, L. & BURGER, A. 2016. Umweltschädliche Subventionen in Deutschland: aktualisierte Ausgabe 2016. In: DEUTSCHLAND. UMWELTBUNDESAMT (ed.). Dessau-Roßlau.
- KOMENDA-ZEHNDER, S. & BRUDERER, B. 2002. Einfluss des Flugverkehrs auf die Avifauna: Literaturstudie. *Schriftenreihe Umwelt*. Bern: Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft,.
- KUTLAR JOSS, M., DYNTAR, D. & RAPP, R. 2015. Gesundheitliche Wirkungen der NO₂-Belastung auf den Menschen: Synthese der neueren Literatur auf Grundlage des WHO-REVIHAAP Berichts Bern: Schweiz. Bundesamt für Umwelt,.
- LANDESAMT FÜR NATUR, U. U. V., NORDRHEIN-WESTFALEN; 2010. Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub und Stickstoffdioxid im Zusammenhang mit der Luftreinhalteplanung Recklinghausen.
- LEE, D. S. 2018a. The current state of scientific understanding of the non-CO₂ effects of aviation on climate.
- LEE, D. S. 2018b. The role of aviation in a post-Paris Agreement Climate World. In Druck.
- LEE, D. S., FAHEY, D. W., FORSTER, P. M., NEWTON, P. J., WIT, R. C. N., LIM, L. L., OWEN, B. & SAUSEN, R. 2009. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43, 3520-3537.
- LOCHMANN, M. 2017. Lärmkartierung nach Umgebungslärmrichtlinie: Fluglärm am Flughafen Frankfurt nach VBUF 2007-2017. In: HESSEN. LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE (HLNUG), (ed.).
- LOPES, J. V. D. O. F. 2010. Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft.
- LORENTZ, H., SCHMIDT, W., HELLEBRANDT, P., KETZEL, M., JAKOBS, H. & JANICKE, U. 2019. Einfluss eines Großflughafens auf zeitliche und räumliche Verteilungen der Außenluftkonzentrationen von Ultrafeinstaub < 100 nm, um die potentielle Belastung in der Nähe zu beschreiben - unter Einbeziehung weiterer Luftschadstoffe (Ruß, Stick-oxide und Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀)): Abschlussbericht des Ing. Büro Lohmeyer zu UFOPLAN FKZ 3716 52 200 0 (in Vorbereitung). *Texte*. Dessau-Rosslau: Deutschland. Umweltbundesamt,.
- MAGLIERI, D. J., BOBBITT, P. J., PLOTKIN, K. J., SHEPHERD, K. P., COEN, P. G. & RICHWINE, D. M. 2014. *Sonic boom: six decades of research*, Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration (NASA),.
- MAIBACH, M., PETER, M. & KILLER, M. 2018. *Szenario Luftverkehr Deutschland unter Einbezug von Umweltaspekten : Teilvorhaben Luftverkehr des FE-Projekts: Anforderungen und Rahmenbedingungen für eine zukunftsorientierte Entwicklung des Güterverkehrs - Eine systematische Analyse auf der Grundlage eines Ländervergleichs*, Zürich, Dessau-Roßlau.
- MATHESON, M., CLARK, C., MARTIN, R., VAN KEMPEN, E. E. M. M., HAINES, M. M., LÓPEZ-BARRIO, I., HYGGE, S. & STANSFELD, S. A. 2010. The effects of road traffic and aircraft noise exposure on children's episodic memory: the RANCH project. *Noise & Health*, 12, 244-254.
- MCGREGOR, P. K., HORN, A. G., LEONARD, M. L. & THOMSEN, F. 2013. Anthropogenic noise and conservation. In: BRUMM, H. (ed.) *Animal communication and noise*. Berlin: Springer,.
- MIEDEMA, H. M. E. & OUDSHOORN, C. G. M. 2001. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental health perspectives*, 109, 409-416.
- MONSHAUSEN, A., RACH, C. & BAYER, M. 2014. Fair Reisen mit Herz und Verstand: Tipps für verantwortungsvolles Reisen. In: BROT FÜR DIE WELT - EVANGELISCHER ENTWICKLUNGSDIENST (ed.). Berlin.
- MOTTSCHELL, M., BERGMANN, T. & LAMBRECHT, M. 2013. *Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland : Arbeitspaket 4 des Projekts "Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewability"*, Dessau-Roßlau.
- MÜLLER-WENK, R. 2002. Zurechnung von lärmbedingten Gesundheitsschäden auf den Strassenverkehr. In: SCHWEIZ. BUNDESAMT FÜR UMWELT, W. U. L. (ed.). Bern.
- MÜNZEL, T., GORI, T., BABISCH, W. & BASNER, M. 2014. Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European Heart Journal*, 35, 829-836.
- MUSTAFIĆ, H., JABRE, P., CAUSSIN, C., MURAD, M. H., ESCOLANO, S., TAFFLET, M., PÉRIER, M.-C., MARIJON, E., VERNEREY, D., EMPANA, J.-P. & JOUVEN, X. 2012. Main Air Pollutants and Myocardial Infarction: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA*, 307, 713-721.

- NEWHOOK, R., LYRETTE, N., ALBERT, M., BEAULAC, V. J., GUINDON-KEZIS, K., HANCOOK-CHEN, T., JESSIMAN, B. & SALMI, L. 2016. Human Health Risk Assessment for Ambient Nitrogen Dioxide. Ottawa: Health Canada. Water and Air Quality Bureau.
- NICHOLLS, M. 2014. Climate Change: Implications for Tourism. In: UNIVERSITY OF CAMBRIDGE (ed.). Cambridge.
- NIKLAß, M., LÜHRS, B., GREWE, V., DAHLMANN, K., LUCHKOVA, T., LINKE, F. & GOLLNICK, V. 2017. Potential to reduce the climate impact of aviation by climate restricted airspaces. *Transport Policy*.
- NITTINGER, O. 2018. Long Term Fleet Fuel Burn Development (2016-2035). *Präsentation auf dem Fachworkshop "Moderne Flugzeugflotten"*. Frankfurt/Main: Lufthansa Group.
- NOACK, T. 2017a. *Planespotters Condor* [Online]. Berlin. Available: <https://www.planespotters.net/airline/Condor> [Accessed 18. April 2017].
- NOACK, T. 2017b. *Planespotters TUIfly* [Online]. Berlin. Available: <https://www.planespotters.net/airline/TUIfly> [Accessed 18. April 2017].
- OHLWEIN, S., HOFFMANN, B., KAPPELER, R., KUTLAR JOSS, M. & KÜNZLI, N. 2018. Health Effects of Ultrafine Particles: systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting. Dessau-Roßlau: Deutschland. Umweltbundesamt.
- PAPPAS, N. V. 2014. The Effect of Distance, Expenditure and Culture on the Expression of Social Status Through Tourism. *Tourism Planning and Development*, 11, 387-404.
- PEETERS, P. M. 2017. *Tourism's impact on climate change and its mitigation challenges: How can tourism become 'climatically sustainable'?* Doktorarbeit, Delft University of Technology.
- PERNER, J., UNTEUTSCH, M. & LÖVENICH, A. 2018. Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende,; Agora Verkehrswende.
- PETZOLD, A., MARSH, R., JOHNSON, M. P., MILLER, M. N., SEVCENCO, Y. A., DELHAYE, D., IBRAHIM, A., WILLIAMS, P. I., BAUER, H., CRAYFORD, A. P., BACHALO, W. D. & RAPER, D. 2011. Evaluation of methods for measuring particulate matter emissions from gas turbines. *Environmental Science and Technology*, 45, 3562-3568.
- PURR, K., GÜNTHER, J., LEHMANN, H. & NUSS, P. 2019. RESCUE - Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- PURR, K., OSIEK, D., LANGE, M., ADLUNGER, K., BURGER, A., HAIN, B., KLAUS, T., LEHMANN, H., MÖNCH, L., PROSKE, C., SCHMIED, M. & VOLLMER, C. 2016. Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. *Position / Umweltbundesamt*. Dessau-Roßlau.
- RAASCHOU-NIELSEN, O., ANDERSEN, Z. J., BEELEN, R., SAMOLI, E., STAFOGGIA, M., WEINMAYR, G., HOFFMANN, B., FISCHER, P., NIEUWENHUIJSEN, M. J., BRUNEKREEF, B., XUN, W. W., KATSOUYANNI, K., DIMAKOPOULOU, K., SOMMAR, J., FORSBERG, B., MODIG, L., OUDIN, A., OFTEDAL, B., SCHWARZE, P. E., NAFSTAD, P., DE FAIRE, U., PEDERSEN, N. L., ÖSTENSON, C.-G., FRATIGLIONI, L., PENELL, J., KOREK, M., PERSHAGEN, G., ERIKSEN, K. T., SØRENSEN, M., TJØNNELAND, A., ELLERMANN, T., EEFTENS, M., PEETERS, P. H., MELIEFSTE, K., WANG, M., BUENO-DE-MESQUITA, B., KEY, T. J., DE HOOGH, K., CONCIN, H., NAGEL, G., VILIER, A., GRIONI, S., KROGH, V., TSAI, M.-Y., RICCIERI, F., SACERDOTE, C., GALASSI, C., MIGLIORE, E., RANZI, A., CESARONI, G., BADALONI, C., FORASTIERE, F., TAMAYO, I., AMIANO, P., DORRONSORO, M., TRICHOPOULOU, A., BAMIA, C., VINEIS, P. & HOEK, G. 2013. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *The Lancet Oncology*, 14, 813-822.
- RAJAGOPALAN SRILATHA, A. 2012. Design of a 4-Seat, General Aviation, Electric Aircraft.
- RAM, Y., NAWIJN, J. & PEETERS, P. M. 2013. Happiness and limits to sustainable tourism mobility: A new conceptual model. *Journal of Sustainable Tourism*, 21, 1017-1035.
- REGIONALE PROJEKTLITSTELLE MODELLREGION RHEIN-MAIN, H. 2013. *E-PORT AN: Elektromobilität am Flughafen Frankfurt* [Online]. Offenbach am Main. Available: <http://www.e-port-an.de/Home.htm> [Accessed 02. Mai 2018].
- REH, W., BREIDENBACH, H., JÄCKER-CÜPPERS, M., LEGE, M., MAHLER, A., MÜLLER-GÖRNERT, M., ZIMMERMANN, A., MERGNER, R., SCHREIBER, A. & TREUDT, G. 2015. NGO-Luftverkehrskonzept: Schritte zu einem zukunftsfähigen und umweltverträglichen Luftverkehr in Deutschland. In: BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (BUND) (ed.). Berlin.
- REINHARDT, A.-S. & MUTERT, T. 2016. Flugrouten: mehr Öffentlichkeitsbeteiligung - bessere Entscheidungen. *Zeitschrift für Umweltrecht*, 84-90.

- RIAH, K., VAN VUUREN, D. P., KRIEGLER, E., EDMONS, J., O'NEILL, B. C., FUJIMORI, S., BAUER, N., CALVIN, K., DELLINK, R., FRICKO, O., LUTZ, W., POPP, A., CUARESMA, J. C., KC, S., LEIMBACH, M., JIANG, L., KRAM, T., RAO, S. T., EMMERLING, J., EBI, K. L., HASEGAWA, T., HAVLÍK, P., HUMPENÖDER, F., ALELUIA REIS, L., SMITH, S. J., STEHFEST, E., BOSETTI, V., EOM, J., GERNAAT, D. E. H. J., MASUI, T., ROGELJ, J., STREFLER, J., DROUET, L., KREY, V., LUDERER, G., HARMSSEN, M. J. H. M., TAKAHASHI, K., BAUMSTARK, L., DOELMAN, J. C., KAINUMA, M. L. T., KLIMONT, Z., MARANGONI, G., LOTZE-CAMPEN, H., OBERSTEINER, M. H., TABEAU, A. & TAVONI, M. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- RIGHI, M., HENDRICKS, J. & SAUSEN, R. 2013. The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol: Simulations for year 2000 emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 9939-9970.
- RILEY, E. A., GOULD, T. R., HARTIN, K., FRUIN, S. A., SIMPSON, C. D., YOST, M. G. & LARSON, T. V. 2016. Ultrafine particle size as a tracer for aircraft turbine emissions. *Atmospheric Environment*, 139, 20-29.
- RINDLISBACHER, T. 2007. Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren: zusammenfassender Bericht. Ittigen: Schweiz. Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL).
- ROSE, D. & JACOBI, S. 2018. 1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt. Wiesbaden: Hessen. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.
- RÜCKERL, R., SCHNEIDER, A. E., BREITNER, S., CYRYS, J. & PETERS, A. C. B. 2011. Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. *Inhalation Toxicology*, 23, 555-592.
- SAUSEN, R., DAHLMANN, K. & GREWE, V. 2017. Bewertung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs. In Druck. Dessau-Rosslau: Deutschland. Umweltbundesamt.
- SAUSEN, R., ISAKSEN, I. S. A., GREWE, V., HAUGLUSTAINE, D., LEE, D. S., MYHRE, G., KÖHLER, M. O., PITARI, G., SCHUMANN, U., STORDAL, F. & ZEREFOS, C. 2005. Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). *Meteorologische Zeitschrift*, 14, 555-561.
- SHELLNHUBER, H. J., MESSNER, D., LEGGEWIE, C., LEINFELDER, R., NAKICENOVIC, N., RAHMSTORF, S., SCHLACKE, S., SCHMID, J. & SCHUBERT, R. 2009. Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz: Sondergutachten. In: WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (WBGU) (ed.). Berlin.
- SCHENK, T. 2009. Methodik zur Ermittlung der Geräuschmissionen bei Triebwerksprobeläufen. *texte*. Dessau-Roßlau: Deutschland. Umweltbundesamt.
- SCHMIDT, P., WEINDORF, W., ROTH, A., BATTEIGER, V. & RIEGEL, F. 2016. Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. In: DEUTSCHLAND. UMWELTBUNDESAMT (ed.) *Hintergrund*. Dessau-Rosslau.
- SCHMIED, M. 2019. Treibstoffschneidablass aus Luftfahrzeugen: Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Präsentation auf dem Fachgespräch „Kerosinablass in Rheinland-Pfalz“ der SPD-Fraktion im Landtag Rheinland-Pfalz In: UMWELTBUNDESAMT, D. (ed.).
- SCHMIED, M., GÖTZ, K., KREILKAMP, E., BUCHERT, M., HELLWIG, T. & OTTEN, S. 2009. Das INVENT-Zielgruppenmodell "Urlaubs- und Reisetile". *Traumziel Nachhaltigkeit: innovative Vermarktungskonzepte nachhaltiger Tourismusangebote für den Massenmarkt*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- SCHMIED, M., WÜTHRICH, P., ZAH, R., ALTHAUS, H.-J. & FRIEDL, C. 2015. Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. *texte*. Dessau-Roßlau: Deutschland. Umweltbundesamt.
- SCHOLL, G., GOSSEN, M., HOLZHAUER, B. & SCHIPPERGES, M. 2017. Umweltbewusstsein in Deutschland 2016: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. In: DEUTSCHLAND. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, N., BAU UND REAKTORSICHERHEIT, & DEUTSCHLAND. UMWELTBUNDESAMT (eds.). Berlin; Dessau-Roßlau.
- SCHOLZE, W. 2007. Luftsport und Naturschutz – Kooperation statt Konfrontation. In: DEUTSCHLAND. BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (ed.) *Naturschutz & Biologische Vielfalt*. Bonn.
- SCHOLZE, W. & KLAASSEN, B. 2009. *Naturschutz für Piloten – natur- und umweltbewusst fliegen. Materialien für die Aus- und Weiterbildung* [Online]. Available: <https://www.daec.de/fachbereiche/umwelt-natur/arbeitsunterlagen/> [Accessed 01. November 2018].

- SCHRECKENBERG, D., FAULBAUM, F., GUSKI, R., NINKE, L., PESCHEL, C., SPILSKI, J. & WOTHGE, J. 2015. Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld: Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belästigung und Lebensqualität; Zusammenfassung. *NORAH: Noise-related annoyance, cognition, and health*. Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.
- SCHULZ, A., BERG, W., GARDINI, M. A., KIRSTGES, T. & EISENSTEIN, B. 2014. *Grundlagen des Tourismus: Lehrbuch in 5 Modulen*, München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- SCHUMANN, U. 1996. On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorologische Zeitschrift*, 5, 4-23.
- SCHÜTTE, S., BARTH, R. & GIEMULLA, E. 2014. Gutachten zur Prüfung von formell- und materiellrechtlichen Vorgehensmöglichkeiten bei der Festlegung von Flugrouten. *texte*. Dessau-Roßlau: Deutschland. Umweltbundesamt.
- SCHÜTTE, S. & BRUNN, C. 2019. Rechtliche Rahmenbedingungen der Lärmkontingentierung. In Druck. *Texte*. Dessau-Roßlau: Öko-Institut e.V.; Deutschland. Umweltbundesamt.
- SCHWARZER, C. & TREBER, M. 2013. Emissionsminderung durch Hochgeschwindigkeitsszüge. In: GERMANWATCH E.V. (ed.). Bonn.
- SCHWENDNER, J. & BUES, H.-J. 2017. Unser Klima, unser Beitrag: Umwelt am Flughafen München. In: FLUGHAFEN MÜNCHEN GMBH (ed.). München.
- SEIDLER, A., WAGNER, M., SCHUBERT, M., DRÖGE, P. & HEGEWALD, J. 2015. Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld: sekundärdatenbasierte Fallkontrollstudie mit vertiefender Befragung. In: GEMEINNÜTZIGE UMWELTHAUS GMBH (ed.) *NORAH: Noise-related annoyance, cognition, and health*. Kelsterbach.
- SØRENSEN, M., ANDERSEN, Z. J., NORDSBORG, R. B., BECKER, T., TJØNNELAND, A., OVERVAD, K. & RAASCHOU-NIELSEN, O. 2013. Long-term exposure to road traffic noise and incident diabetes: a cohort study. *Environmental health perspectives*, 121, 217-222.
- SPANNOWSKY, W., RUNKEL, P. & GOPPEL, K. 2010. Raumordnungsgesetz : (ROG) ; Kommentar. Stand: 01.04.2010 ed. München: C. H. Beck.
- STANSFELD, S. A., BERGLUND, B., CLARK, C., LÓPEZ-BARRIO, I., FISCHER, P., ÖHRSTRÖM, E., HAINES, M. M., HEAD, J. A., HYGGE, S., VAN KAMP, I. & BERRY, B. 2005. Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. *Lancet*, 365, 1942-1949.
- STATISTISCHES BUNDESAMT 2013. Luftverkehr auf allen Flugplätzen 2012. *Fachserie 8 Reihe 6.2*. Wiesbaden.
- STATISTISCHES BUNDESAMT 2018a. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2017. *Fachserie 3 Reihe 5.1*. Wiesbaden.
- STATISTISCHES BUNDESAMT 2018b. Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen 2017. *Fachserie 8 Reihe 6.1*. Wiesbaden.
- STATISTISCHES BUNDESAMT 2019a. Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel 2018 (vorläufige Ergebnisse). *Fachserie 7 Reihe 1*. Wiesbaden.
- STATISTISCHES BUNDESAMT 2019b. Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel 2018 (vorläufige Ergebnisse). *Fachserie 7 Reihe 1*. Wiesbaden.
- STROGIES, M. & GNIFFKE, P. 2019. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019 : nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2017 ; Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission. *Climate Change / Umweltbundesamt*. Stand: 15. April 2019 ed. Dessau-Roßlau.
- THE WORLD BANK GROUP (WBG), H. 2009. Air Freight: A Market Study with Implications for Landlocked Countries. Washington, D. C.
- THIELMANN, A., SAUER, A., ISENMANN, R., WIETSCHEL, M. & PLÖTZ, P. 2012. *Technologie-Roadmapping am Fraunhofer ISI : Konzepte - Methoden - Praxisbeispiele*, Karlsruhe, Fraunhofer ISI.
- TOBOLLIK, M., HINTZSCHE, M., WOTHGE, J., MYCK, T. & PLASS, D. 2019. Burden of Disease Due to Traffic Noise in Germany. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 2304.
- TORIJA, A. J., SELF, R. H. & FLINDELL, I. H. Evolution of noise metrics in future aviation scenarios in the UK. ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics, 10. bis 14. Juli 2016 2016 Athen. 8.
- UMWELTBUNDESAMT. 2018. *Belastung der Bevölkerung durch Fluglärm in der Umgebung der Großflughäfen nach Umgebungslärmrichtlinie, Tag-Abend-Nacht-Index (LDEN) und Nachtlärmindex (LNight)* [Online]. Dessau-Roßlau. Available:

- https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/5_tab_fluglaerm_gfh_2018-08-08.png [Accessed 09. November 2018].
- UMWELTBUNDESAMT, H. 2015. Durch Umweltschutz die biologische Vielfalt erhalten: ein Themenheft des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau.
- UMWELTBUNDESAMT, H. 2016. *Nachhaltigkeit in der Bundesverwaltung* [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-in-der-bundesverwaltung> [Accessed 17. April 2018].
- UMWELTFRAGEN, S. F. 2017. *Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor : Sondergutachten*, Berlin, Sachverständigenrat für Umweltfragen.
- UNITED STATES. ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA) 2016. Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen – Health Criteria. Washington, D.C.
- VAN KEMPEN, E. E. M. M., CASAS, M., PERSHAGEN, G. & FORASTER, M. 2018. WHO environmental noise guidelines for the European Region: a systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: a summary. *International journal of environmental research and public health*, 15.
- VERBRAUCHERZENTRALE 2010. Flugimporte von Lebensmitteln und Blumen nach Deutschland.
- VIENNEAU, D., SCHINDLER, C., PEREZ, L., PROBST-HENSCH, N. & RÖÖSLI, M. 2015. The relationship between transportation noise exposure and ischemic heart disease: a meta-analysis. *Environmental research*, 138, 372-380.
- WETZEL, F. 2019. Treibstoffschnellablass aus Luftfahrzeugen: Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Umweltbundesamt.
- WOLLMANN, U. 2017. Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie in Sachsen: Lärmkartierung 2017 am Flughafen Leipzig-Halle. In: SACHSEN. LANDESAMT FÜR UMWELT, L. U. G. (ed.).
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, H. 2011. Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, H. 2018. Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen.
- ZHENG, X.-Y., DING, H., JIANG, L.-N., CHEN, S.-W., ZHENG, J.-P., QIU, M., ZHOU, Y.-X., CHEN, Q. & GUAN, W.-J. 2015. Association between Air Pollutants and Asthma Emergency Room Visits and Hospital Admissions in Time Series Studies: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS ONE*, 10, e0138146.