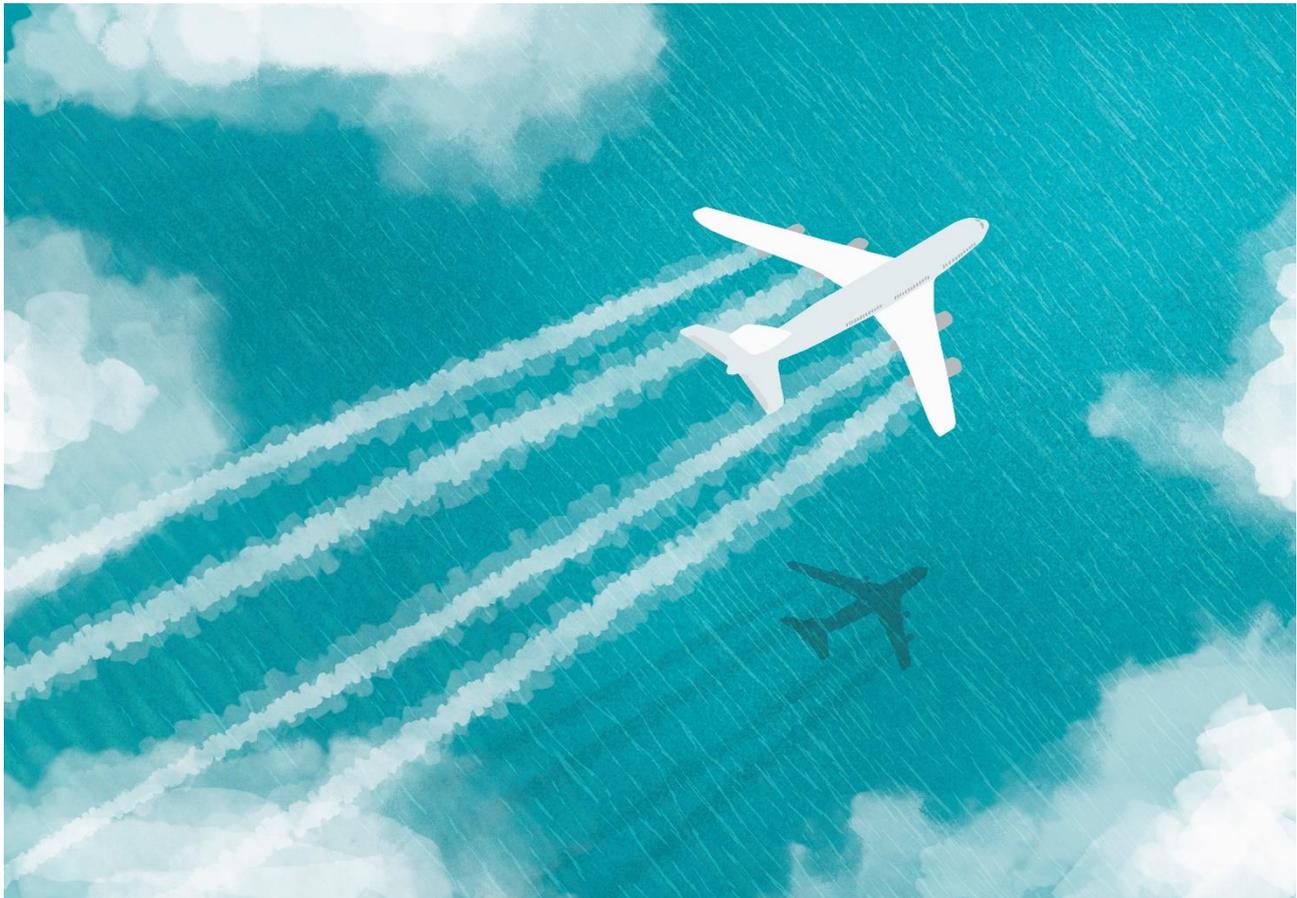


Factsheet 1: Klimaschädliche Wirkungen des Luftverkehrs



Copyright: fStopImages/Malte Müller

Fliegen ist die klimaschädlichste Form der Mobilität: Die Verbrennung von fossilem Kerosin erzeugt zum einen CO₂-Emissionen, zum anderen trägt es durch Stickoxide, Kondensstreifen und Veränderung der Bewölkung zur Klimaerhitzung bei.

Doch wie sehen die Klimawirkungen des Luftverkehrs genau aus? Dazu fassen wir hier die wichtigsten Informationen zusammen. Wir zeigen, in welchem Umfang wir heute fliegen und fragen: Wer fliegt aus welchen Gründen? Und wie viele Emissionen entstehen dabei? Wie wirkt der Luftverkehr konkret auf das Klima und warum sollte er nach Ende der Covid-19-Pandemie nicht einfach weiterwachsen wie bisher? Wie klimaschädlich ist die Fortbewegung mit dem Flugzeug im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln? Und welche weiteren Auswirkungen auf die Umwelt und Gesundheit spielen noch eine Rolle?

Inhaltsverzeichnis

1	WIE WIR HEUTE FLIEGEN	3
1.1	Wie viel fliegen wir?	3
1.2	Wohin fliegen wir?	4
1.3	Inlandsflüge in Deutschland	6
1.4	Warum fliegen wir?	7
1.5	Wer fliegt?	9
1.6	Wie viele Treibhausgasemissionen entstehen dabei?	10
2	WIE WIRKEN FLUGEMISSIONEN?	12
2.1	Wie wirkt der Luftverkehr auf das Klima?	12
2.2	Wie kann die gesamte Klimawirkung gemessen werden?	14
3	VERKEHRSMITTEL IM VERGLEICH	14
3.1	Was sind die relevanten Faktoren der Klimabilanz?	15
3.2	Was unterscheidet die Treibhausgasemissionen im Luftverkehr?	16
3.3	Treibhausgasemissionen im Vergleich	18
4	LUFTSCHADSTOFFE UND LÄRM	19
4.1	Luftschadstoffe	19
4.2	Lärm	20
5	LITERATURVERZEICHNIS UND WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN	22

1 WIE WIR HEUTE FLIEGEN

1.1 Wie viel fliegen wir?

Von 2001 bis zum Beginn der Covid-19-Pandemie hat die Zahl der Fluggäste an deutschen Flughäfen kontinuierlich zugenommen, mit Ausnahme eines leichten Rückgangs 2009 und 2010 infolge der Finanzkrise. 2018 stiegen mehr als 247 Millionen Menschen an deutschen Flughäfen ein, aus oder um. Im Vergleich zu 2001 ist das eine Zunahme um 72 %. Mehr als ein Viertel aller Fluggäste startete oder landete am größten deutschen Flughafen in Frankfurt/Main (BMVI 2019, 88f.).

Weltweit sind der Luftverkehr und damit die klimaschädlichen Emissionen sogar noch stärker gewachsen. So gab es 2018 mehr als 4,3 Milliarden Passagierinnen und Passagiere, das sind zweieinhalb Mal so viele Fluggäste wie noch 2000 (The World Bank 2019).

Wie viele Personen, über wie viele Kilometer?

Gemessen in der **Personenverkehrsleistung**, also der Anzahl an beförderten Personen multipliziert mit der Strecke, die sie zurückgelegt haben, machte der Luftverkehr über dem Bundesgebiet 2018 6 % der gesamten Verkehrsleistung aus (BMVI 2019, S. 221). Das klingt auf den ersten Blick wenig, doch ist Fliegen die mit weitem Abstand klimaschädlichste Mobilitätsform (siehe Kapitel 3). Außerdem wächst der Luftverkehr um ein Vielfaches schneller als alle anderen Personenverkehrsarten: in Deutschland nahm er zwischen 2001 und 2018 insgesamt um mehr als 60 % auf über 70 Milliarden **Personenkilometer**, also die Summe aller Kilometer, die in Deutschland mit dem Flugzeug zurückgelegt wurden, zu, während die Verkehrsleistung im gesamten Personenverkehr nur um etwa 11 % wuchs (BMVI 2019, S. 218–219).

Personenverkehrsleistung:

Produkt aus der Personenzahl und der zurückgelegten Strecke, Angabe in Personenkilometer (pkm) gemessen.

Personenkilometer: oder pkm, Maßeinheit für die Verkehrsleistung in Bezug auf Personen, das sich als Produkt zwischen der Zahl der beförderten Passagiere und der zurückgelegten Entfernung in Kilometern bemisst.

Auch in der EU ist der Luftverkehr stetig gewachsen. Gemessen in Personenkilometern legte er zwischen 2000 und 2017 insgesamt um etwa 40% zu (EEA 2019). Auf Europa entfiel 2018 etwa ein Viertel des globalen Luftverkehrs gemessen an der Personenverkehrsleistung (ICAO 2019). Das weltweit größte Wachstum der jährlichen Passagierzahlen verzeichnete in diesem Jahr jedoch China (IATA 2019).

Gütertransport per Flugzeug

Auch der Umfang von Gütern und Post, die mit dem Flugzeug transportiert werden, hat enorm zugenommen. 2018 waren es in Deutschland knapp fünf Millionen Tonnen – eine Verdopplung im Vergleich zu 2001 (BMVI 2019, 240f.). Allerdings machten die Güter, die per Flugzeug transportiert werden, 2018 weniger als 1 % der nach Deutschland beförderten Fracht und etwa 1,5 % der aus Deutschland ausgeführten Fracht aus. Einen Großteil davon waren hochwertige Güter wie elektrotechnische Waren, Maschinen, optische Geräte, Pharmaerzeugnisse und Schmuck (BDL 2017).

Auswirkungen der Covid-19-Pandemie auf den Luftverkehr

Noch 2019 prognostizierte das Bundesverkehrsministerium, dass die Zahl der Flugpassagierinnen und -passagiere in Deutschland zwischen 2018 und 2021 von 223 Millionen auf 244 Millionen steigen würde – also ein Wachstum von 9 % innerhalb von drei Jahren (BMVI 2019, S. 344). Und auch die internationale Luftverkehrsorganisation ICAO ging in 2018 noch davon aus, dass der Luftverkehr global bis 2045 um mehr als 4 % jährlich wachsen würde (ICAO 2018). Die Covid-19-Pandemie im Jahr 2020 konnte zu diesem Zeitpunkt noch niemand absehen. Ihre Auswirkungen waren und sind für die Flugbranche folgenschwer: Im April 2020 fanden weltweit nur etwa 30 % der geplanten Flüge statt. In Deutschland und der EU kam der Luftverkehr im Frühjahr fast vollständig zum Erliegen. Und für das Gesamtjahr wird sowohl für Deutschland, in der EU als auch weltweit erwartet, dass weniger als halb so viele Flugzeuge in der Luft sein werden wie 2019 (DFS 2020; Eurocontrol 2020; ICAO 2020).

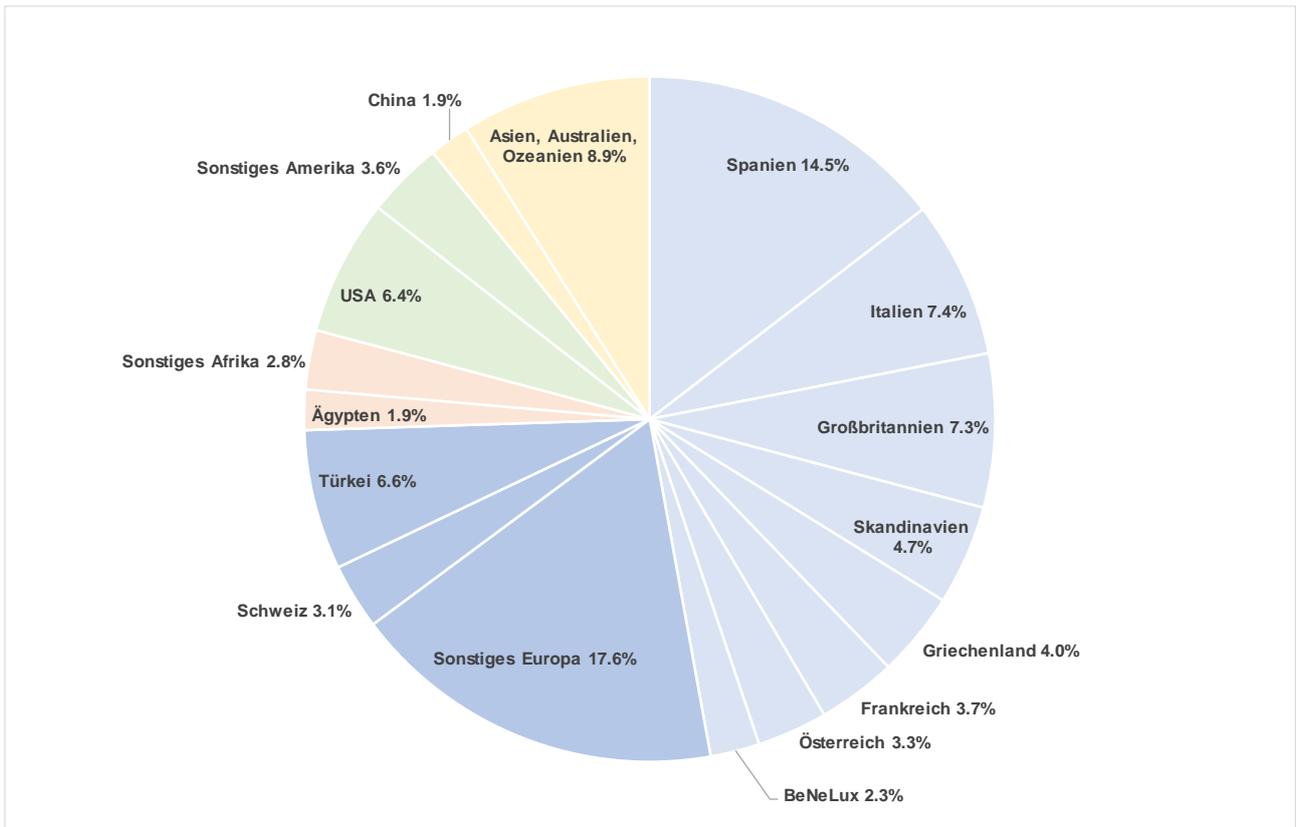
Auch der globale Frachtverkehr verringerte sich durch die Pandemie deutlich, er brach im April 2020 um knapp 30% im Vergleich zum Vorjahr ein. Trotzdem konnte die Nachfrage an Flügen zur Beförderung von Frachtgütern nicht gedeckt werden, weil das Angebot für sogenannte Belly-Fracht, die im Bauch von Passagierflugzeugen transportiert wird, noch stärker eingebrochen war (IATA 2020a). Aufgrund der dynamischen Entwicklung der Pandemie ist es schwierig, Prognosen für die Entwicklung des Luftverkehrs in den nächsten Jahren zu machen. Die derzeitigen Vorhersagen gehen davon aus, dass es mehrere Jahre dauern wird, bis der Luftverkehr wieder das Niveau erreicht haben wird, das er vor der Covid-19-Pandemie hatte (IATA 2020c; Öko-Institut 2020; ICAO 2020). Zum ungebremsen Wachstum des Luftverkehrs sollten wir aber nicht zurückkehren (siehe Factsheet 5).

1.2 Wohin fliegen wir?

Fast drei Viertel aller Passagierinnen und Passagiere aus Deutschland flogen 2018 in andere europäische Länder, die meisten von ihnen nach Spanien (BMVI 2019, S. 179).

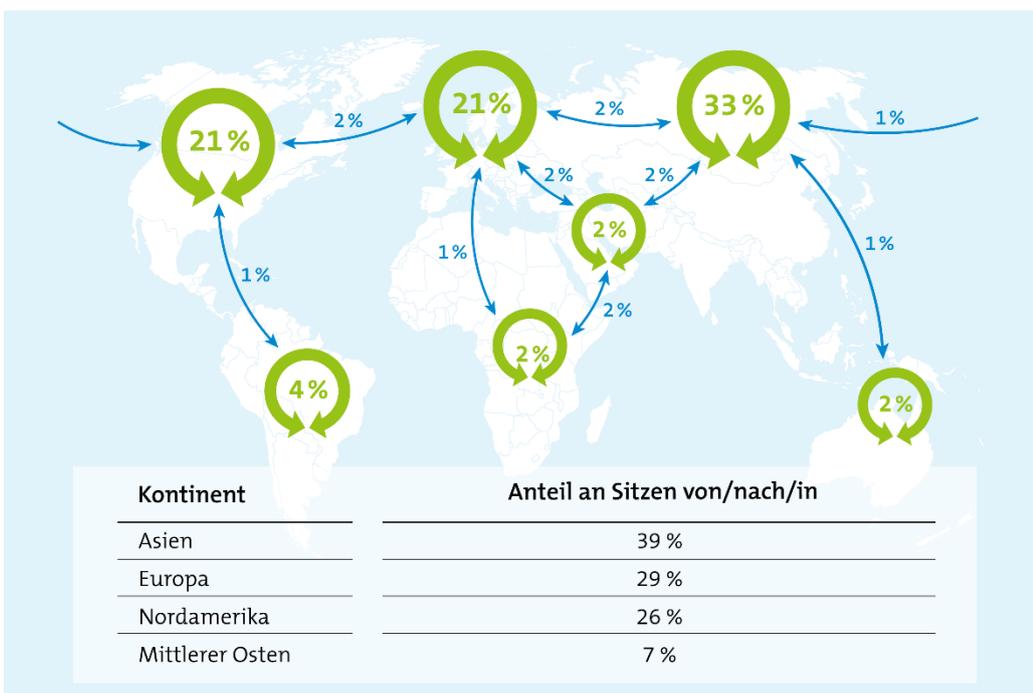
Weltweit gesehen hatte die Region Asien-Pazifik in 2019 den größten Anteil am globalen Luftverkehr: 33 % entfallen auf Verbindungen innerhalb Asiens. Der innerchinesische Luftverkehr macht 13 % des weltweiten Luftverkehrs aus, auf Verbindungen innerhalb von Nordamerika und Europa gehen je 21 % zurück (BDL 2020, S. 3). Die verkehrsreichste Langstrecke war 2019 die Achse zwischen New York und San Francisco (Official Aviation Guide 2020).

Abbildung 1: Reisende aus Deutschland nach Zielländern (in %)



Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von BMVI 2019, S. 180

Abbildung 2: Verteilung des weltweiten Luftverkehrs (in Sitzplatzangebot)



Quelle: BDL 2020, S. 3

1.3 Inlandsflüge in Deutschland

Etwa 20 % der Passagierinnen und Passagiere aus Deutschland treten einen Inlandsflug an (UBA 2019a, S. 30). Viele Inlandsflüge sind zudem Zubringer zu großen Flughäfen (BDL 2018). Insgesamt verursachen innerdeutsche Flüge eine Klimawirkung von ungefähr 2,4 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (unter Berücksichtigung aller klimaschädlichen Effekte des Luftverkehrs) – das ist mehr als sieben Mal so viel wie die Klimawirkung durch entsprechende Bahnreisen (UBA 2019a, S. 30).

Besser mit der Bahn

Innerdeutsche Flüge unter 600 Kilometern könnten und sollten in Deutschland auf die Schiene verlagert werden. 2015 hätte das 18,5 Millionen Passagierinnen und Passagiere betroffen. Für ein Viertel von ihnen wäre die Reise mit der Bahn sogar schneller gewesen als die mit dem Flugzeug. Die Hälfte dieser Reisenden könnte mit der Bahn zudem in weniger als vier Stunden an ihr Ziel kommen – also ohne Zeitverlust und mit der Möglichkeit, Dienstreisen innerhalb eines Tages durchzuführen. Ein Verbot von Kurzstreckenflügen wird übrigens von vielen Menschen befürwortet. So sprechen sich in Europa 62 % der Menschen dafür aus, in Amerika 49 % und in China 80 % (EIB 2019).

Etwa 1,6 Millionen Tonnen Treibhausgase könnten durch eine Verlagerung des Großteils der innerdeutschen Flüge vermieden werden (UBA 2018a, S. 68–74). In Deutschland gibt es bereits auf vielen Strecken schnelle Alternativen mit der Bahn, diese verfügt zudem bereits auf vielen Strecken über Kapazitäten, um die zusätzlichen Fahrgäste an ihr Ziel zu bringen. Dennoch müssen die Kapazitäten auch weiter ausgebaut werden. So hat die Verkürzung der Fahrzeit der Bahn zwischen Berlin und München durch eine neue Schnellfahrstrecke gezeigt, dass ein Umstieg möglich ist, wenn gute Alternativen verfügbar sind. Denn auf dieser Strecke hat die Bahn das Flugzeug als wichtigstes Verkehrsmittel abgelöst (UBA 2019a, S. 30).

Außerdem sollte die nahtlose Weiterreise von Passagierinnen und Passagieren aus Langstreckenflügen mit der Bahn gewährleistet werden. Hierfür müssen die Knotenpunkte des Bahnverkehrs – also Hamburg, Köln, Frankfurt am Main, Mannheim und München – weiter ausgebaut, aber auch die Anschlussverbindungen an kleinere Knotenpunkte verbessert werden („Deutschland-Takt“) (BUND e.V. 2019; Agora Verkehrswende 2020). So könnten auch unrentable Regionalflughäfen geschlossen werden, weil eine schnelle Bahnanbindung aller Regionen an die Flughäfen mit Langstreckennetz vorhanden wäre (siehe Factsheet 2).

Auch europaweit gibt es noch viel zu tun: Die Verbindungen müssten weiter ausgebaut und insbesondere mehr Nachtzugverbindungen angeboten werden (siehe Factsheet 3) (Bleijenberg 2020).

Politische Signale

Die Covid-19-Pandemie könnte die Bedeutung von Flügen verringern. Videokonferenzen haben sich als gute Alternative insbesondere zu innerdeutschen Reisen erwiesen. Frankreich und Österreich sind in der Pandemie einen Schritt voran gegangen und haben die Unterstützung für Air France und Austrian Airlines daran geknüpft, dass die Fluglinien die Zahl der Inlandsflüge reduzieren. Leider wurden die Finanzhilfen für die Lufthansa durch den Bund nicht mit entsprechenden Vorgaben zur Reduktion der Inlandsflüge verknüpft. Auch Deutschland sollte Maßnahmen ergreifen, um Inlandsflüge auf die Schiene zu verlagern. Denn auch wenn die Klimawirkung von

Langstreckenflügen viel größer ist als die von Kurzstreckenflügen, sind Inlandsflüge unnötig und sollten vermieden werden.

1.4 Warum fliegen wir?

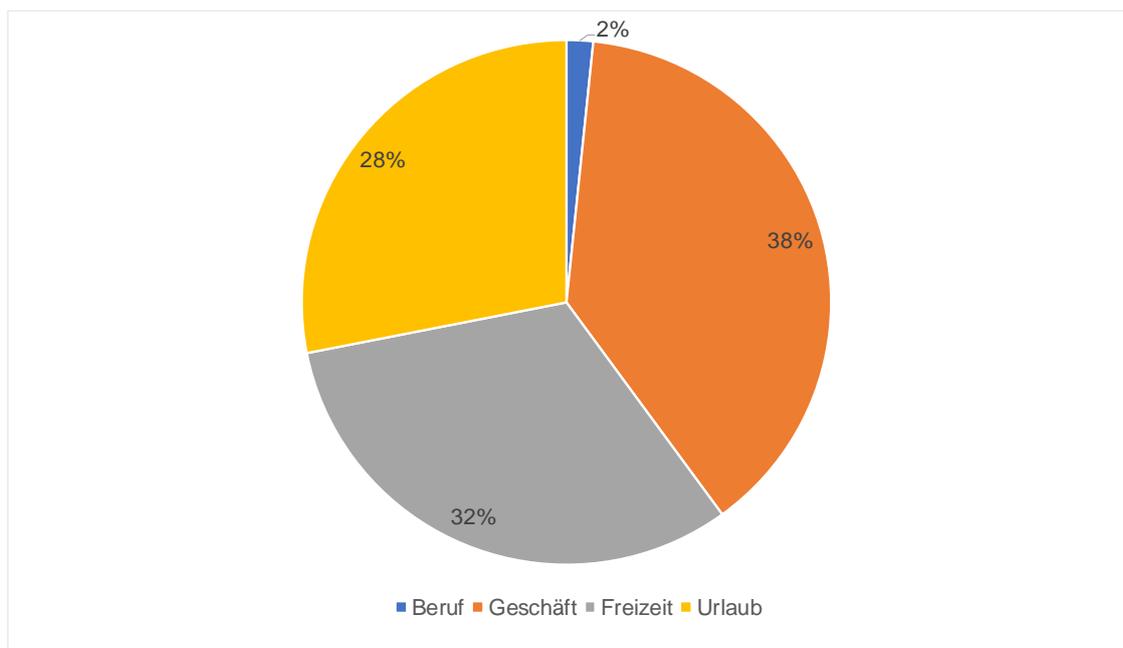
Die meisten Menschen nehmen in Deutschland aus privaten Gründen das Flugzeug, um in den Urlaub zu fliegen oder eine Freizeitreise zu machen. Dazu zählt zum Beispiel, einen Trip übers Wochenende nach Budapest zu machen, Freunde in Paris zu besuchen oder den Lieblingsfußballverein zum Champions League Spiel nach Barcelona zu begleiten. Ungefähr 28 % der Flugreisen sind Urlaubsreisen, die mindestens fünf Tage dauern (BMVI 2019, 212-214; 222-223).

Freizeit oder Arbeit?

2017 gab es 213 Millionen Flugreisen von Passagierinnen und Passagieren, die in Deutschland in- oder umstiegen. Etwa 38 % von ihnen waren dienstlich unterwegs (BMVI 2019, 212-214; 222-223). Während innerhalb Deutschlands die Geschäftsreisen mit etwa 65 % den größten Teil der Flüge ausmachen, sind knapp 60 % der Reisen ins europäische Ausland und 70 % des Interkontinentalverkehrs Urlaubsreisen (DLR 2020a; BDL 2018). Diese können in Zukunft klimafreundlicher gestaltet werden als mit dem Flugzeug (siehe Factsheet 3).

Global gibt es keine umfassenden Daten, aus welchen Gründen Menschen eine Flugreise antreten. Als Trend lässt sich jedoch beobachten, dass die Zahl der Dienstreisen in den vergangenen Jahren abgenommen hat, während die Zahl der sogenannten VFR-Flüge zunimmt. VFR steht dabei für *visiting friends and relatives*; Freunde, Freundinnen und Familienmitglieder also, die zunehmend über den Globus verstreut leben (Zeit Online 2019).

Abbildung 3: Warum reisen Menschen in Deutschland mit dem Flugzeug?



Erläuterungen Werte enthalten Doppelzählungen von umsteigenden Personen. Der Berufsverkehr umfasst alle Wege zwischen Wohnung und Arbeitsstätte; der Geschäfts- oder Dienstreiseverkehr alle anderen beruflich bedingten Fahrten. Das können längere geschäftliche Reisen, aber auch regelmäßige berufliche Wege sein - so etwa von Vertreterinnen und Vertretern.

Quelle: eigene Darstellung; BMVI 2019, S. 222–223 auf der Basis von Berechnungen von DLR und DIW

Auch das Militär hat einen Anteil am Flugaufkommen: Er lag in Deutschland vor der Covid-19-Pandemie bei 1,4 % (Bundeswehr 2020).

Transport von Luftfracht

Ein weiterer Teil des Luftverkehrs dient dem Transport von Luftfracht. Sie ist die schnellste Möglichkeit, Waren von einem Ort an einen anderen zu bringen. Während ein Containerschiff von Asien nach Europa drei bis vier Wochen unterwegs ist, können Güter per Luftfracht bereits am Folgetag am Ziel sein. Luftfracht wird entweder in Frachtflugzeugen oder als „Belly-Fracht“ im Bauch von Passagierflugzeugen transportiert. Neben verderblichen Waren wie frischen Lebensmitteln oder Schnittblumen sind dies insbesondere kapitalintensive Güter. Die Waren kommen so schneller in den Verkauf, Kapitalbindung und Warenumschlagszeit können verringert und die Gesamtkosten, um Waren in den Handel zu bringen, trotz der deutlich höheren Transportkosten reduziert werden. Die hohe Geschwindigkeit ist auch für Expresssendungen der Kurier-, Express- und Paketdienste und dringende Ersatzteillieferungen erforderlich. Für die globalisierte Warenwelt ohne Lagerhaltung ist Luftfracht daher sehr wichtig (Kranke et al. 2011). Trotzdem gibt es Alternativen (siehe Factsheet 3).

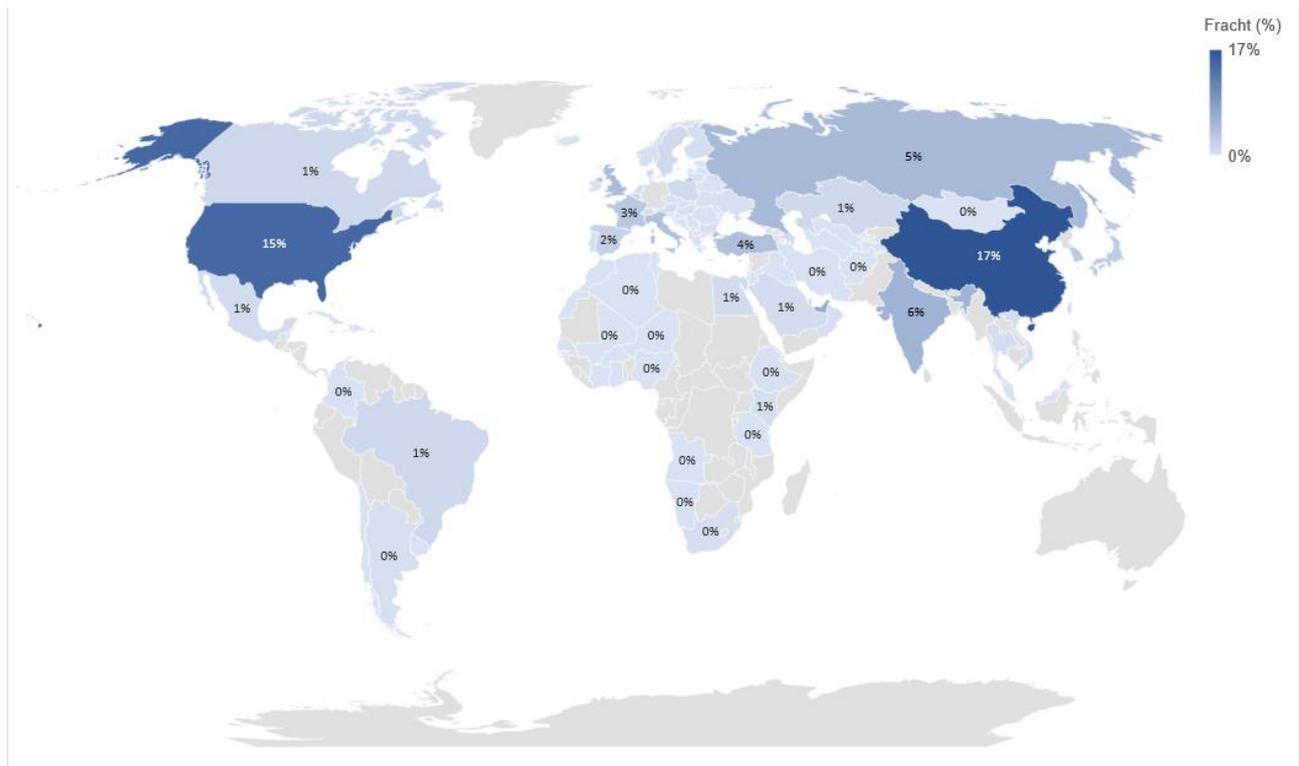
Deutscher Außenhandel: nur ein kleiner Teil Luftfracht

2019 wurden von deutschen Verkehrsflughäfen rund 2,4 Millionen Tonnen Fracht und Post per Flugzeug ins Ausland transportiert – vor allem in die USA – und rund 2,2 Millionen Tonnen aus dem Ausland kommend entladen (Destatis 2020a) – vor allem aus China. Damit macht die Luftfracht in Bezug auf das Güterverkehrsaufkommen nur einen sehr kleinen Teil aus – der deutsche Außenhandel wird durch den Straßengüterverkehr und die Seeschifffahrt dominiert.

Bezogen auf den Generalhandel, also den Außenhandel ohne Transithandel und Zwischenauslandsverkehr, hatte die Luftfracht 2018 einen Anteil von 0,2 % (Einfuhr) bzw. 1,5 % (Ausfuhr) am Gesamtgewicht der Güter. Bezogen auf den Wert der Güter lag der Anteil der Luftfracht aufgrund des höheren Warenwerts bei 9,7 % (Einfuhr) bzw. bei 12,8 % (Ausfuhr) (BMVI 2019). Allerdings nahm die Menge der per Luftfracht transportierten Waren nach und aus Deutschland bis vor der Covid-19-Pandemie konstant zu, allein zwischen 2012 und 2018 um 16 %.

Bei der Diskussion um Luftfracht müssen wir den Zusammenhang mit dem Personenverkehr im Blick behalten. Etwa die Hälfte der Güter wurde in den vergangenen Jahren im Bauch von Passagiermaschinen als sogenannte Belly-Fracht transportiert. Bleiben nun Reisende zunehmend am Boden, hat dies Einfluss auf die Kapazität in der Luftfracht: Im Zuge der Covid-19 Krise ist beispielsweise die Kapazität für Belly-Fracht international um 75 % eingebrochen (IATA 2020a), was zu einer Erhöhung der Preise gesorgt hat. Sie lagen für Luftfracht nach China dadurch im ersten Quartal 2020 40 % über dem 4. Quartal 2019 (Destatis 2020b).

Abbildung 4: Ausladung von Fracht und Post – Verflechtung mit dem Ausland



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Destatis 2020a

1.5 Wer fliegt?

Bis zur Covid-19-Pandemie ist der Luftverkehr global seit langem gestiegen. Doch während jedes Jahr mehr Personenkilometer in einem Flugzeug zurückgelegt werden, haben Menschen weltweit in sehr unterschiedlichem Ausmaß daran teil. Den Großteil der Flüge legt nur ein kleiner Teil der Menschen aus den wohlhabendsten Gesellschaften der Welt zurück.

Schätzungen zufolge fliegen pro Jahr nur ungefähr 3 % aller Menschen (Gössling 2019). Während vielfliegende Menschen über hundert Flüge pro Jahr machen (Lassen 2016; Gössling et al. 2009), hat der überwiegende Teil der Menschheit noch nie ein Flugzeug von innen gesehen. So sind etwa 1 % der Weltbevölkerung für ungefähr 50 % der Emissionen aus dem Luftverkehr verantwortlich (Gössling und Humpe 2020). Auch innerhalb wohlhabender Länder fliegen die Menschen unterschiedlich viel. Eine Studie aus Großbritannien zeigt, dass Menschen mit höheren Einkommen im Vergleich zu Menschen mit niedrigen Einkommen überproportional häufig fliegen (Banister 2018). Die Einführung von Billigflügen in den 1990ern hat dieses Verhältnis nicht wesentlich verändert.

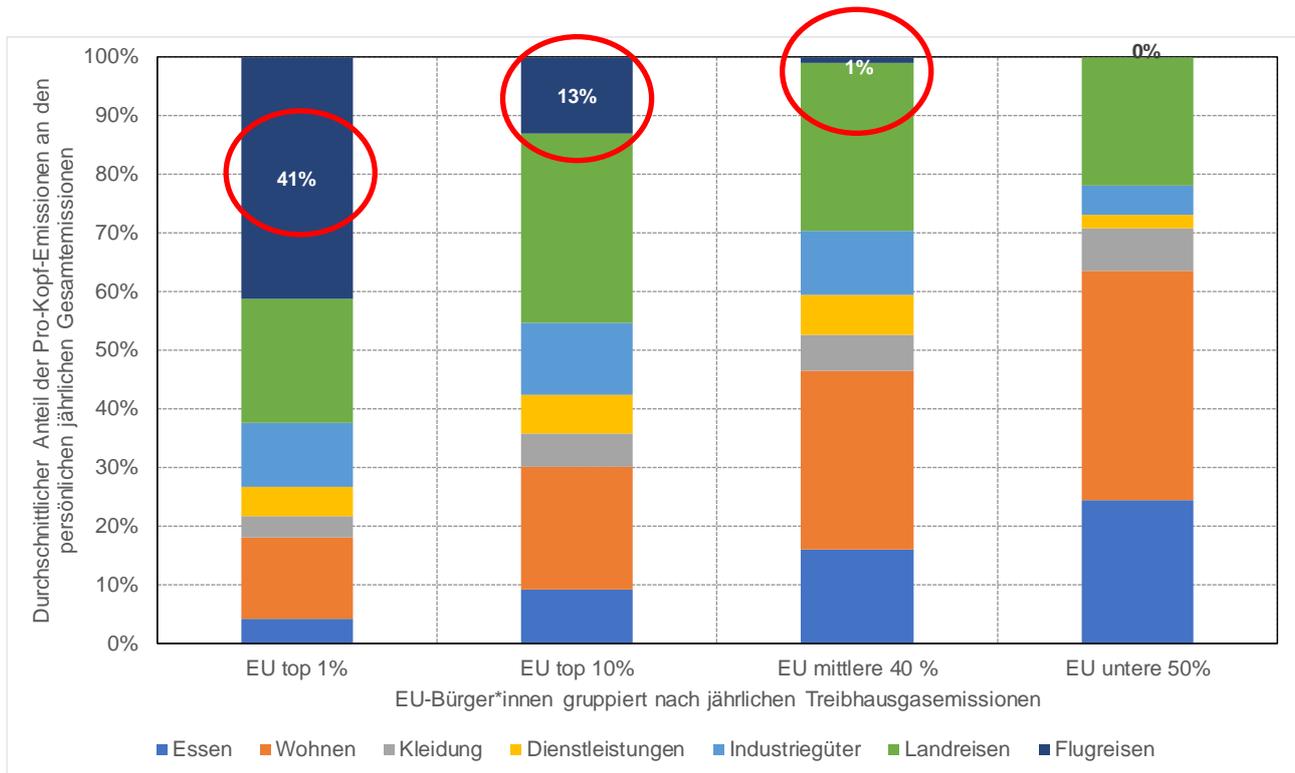
Die meisten Personenkilometer werden in der Region Asien-Pazifik zurückgelegt, für sie wird ebenfalls das stärkste Wachstum in den nächsten Jahrzehnten vorhergesagt. Denn: Die Mittelschicht wächst dort stark (Airbus 2019).

Der Anteil der Luftverkehrsemissionen an den Pro-Kopf-Emissionen ist bei der Bevölkerungsgruppe mit hohen Treibhausgasemissionen erheblich. Bei den 1 % der Menschen, die die höchsten Emissionen verursachen – durchschnittlich insgesamt 55 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Kopf - macht der Luftverkehr mit 22,6 Tonnen CO₂-Äquivalenten etwa 41 % der Emissionen aus. Diese Gruppe, die am meisten von den Subventionen des Luftverkehrs (siehe Factsheet 2) profitiert, umfasst gleichzeitig die Menschen mit den höchsten Einkommen (Ivanova und Wood 2020). Würden noch

die indirekten Klimawirkungen des Fliegens hinzugerechnet (siehe Kapitel 2), würde sich der Anteil des Luftverkehrs an den Gesamtemissionen dieser Gruppe sogar ungefähr verdreifachen.

In Ländern des globalen Südens stellt sich hingegen für viele Menschen gar nicht die Frage, ob sie fliegen oder nicht, weil sie zu wenig Geld haben oder nicht an einen Flughafen angebunden sind. Darüber hinaus schränken Visa-Regelungen weltweit die Reisefreiheit des Großteils der Menschen beträchtlich ein. EU-Bürgerinnen und Bürger können durchschnittlich in 183 Länder visumsfrei einreisen; Bürgerinnen und Bürger des afrikanischen Kontinents dagegen nur in 61 Länder (Henley & Partners 2020).

Abbildung 5: Anteil des Luftverkehrs an den jährlichen Gesamtemissionen pro Kopf in der EU, gruppiert nach Höhe der gesamten Emissionen

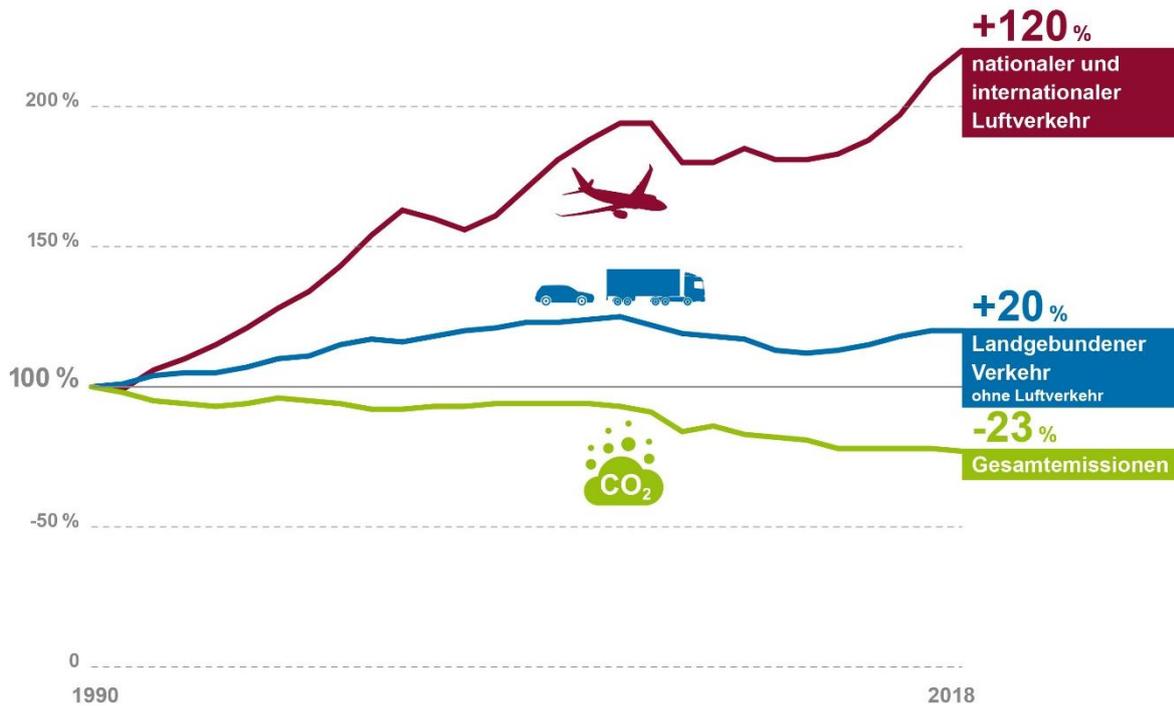


Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Ivanova und Wood 2020, S. 7

1.6 Wie viele Treibhausgasemissionen entstehen dabei?

Internationale Flugreisen aus Deutschland verursachten 2018 insgesamt 29,4 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen. Inlandsflüge sind dabei nicht berücksichtigt. Das sind ungefähr 3,4 % der gesamten deutschen Emissionen in diesem Jahr und etwa so viel, wie Los Angeles mit knapp vier Millionen Einwohnerinnen und Einwohnern jährlich ausstößt. Die CO₂-Emissionen aus dem innereuropäischen Luftverkehr und dem EU-Anteil an internationalen Flügen machten 2018 mit 182 Millionen Tonnen etwa 4 % der gesamten Emissionen der EU-28 aus. Die Emissionen von internationalen Flügen aus der EU sind seit 1990 zudem nahezu kontinuierlich gestiegen (EEA 2020).

Abbildung 6: Wie sich die Treibhausgasemissionen in der EU entwickelt haben



Quelle: Öko-Institut 2020

Global verursachte der Luftverkehr 2018 insgesamt 2,4 % aller vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen (Lee et al. 2020). In 2019 waren das 914 Millionen Tonnen CO₂ (IATA 2020b). Das mag nicht viel klingen, ist aber aus Klimaschutzperspektive aus mehreren Gründen problematisch:

- Die CO₂ Emissionen alleine sind für das Klima nur begrenzt aussagekräftig. **Der tatsächliche Beitrag des Luftverkehrs zur Erderhitzung ist etwa drei Mal so groß wie der Beitrag der CO₂-Emissionen alleine** (Lee et al. 2020). Das liegt daran, dass er weitere klimaschädliche Wirkungen hat, zum Beispiel durch Wolkenbildung (siehe Kapitel 2). **Nach Berechnungen des Öko-Instituts war der Luftverkehr in 2018 insgesamt für etwa 5,5% der menschengemachten Klimaerhitzung verantwortlich.**
- Vor der Covid-19-Pandemie sind die Emissionen aus dem Luftverkehr kontinuierlich gewachsen; zwischen 2013 und 2018 global jährlich um etwa 5 % (Lee et al. 2020). Prognosen sagen ein weiteres exponentielles Wachstum für die nächsten Jahrzehnte voraus (siehe Factsheet 5); ob die Covid-19-Pandemie eine Trendwende im Luftverkehr einläutet, bleibt fraglich. 2020 wird davon ausgegangen, dass die klimaschädlichen Emissionen des Luftverkehrs nach der Pandemie weiter steigen, solange keine strikteren Maßnahmen zur Regulierung und Entwicklung nachhaltiger Technologien ergriffen werden (T&E 2020).
- Während die Emissionen kontinuierlich gewachsen sind, sind Technologien zum klimaneutralen Fliegen weiterhin nicht in Reichweite (siehe Factsheet 5). Das ist nicht vereinbar mit der globalen Dekarbonisierung, die notwendig ist, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen und die Erderhitzung so weit wie möglich zu begrenzen. Ohne drastische und schnelle Maßnahmen zur Reduzierung des Luftverkehrs ist es möglich, dass in Zukunft hier ein Großteil der globalen Emissionen entsteht.

- Wäre der Luftverkehr ein Land, wäre er 2019 in der Top Ten der Länder mit den höchsten Emissionen zu finden gewesen. Im Gegensatz zu Staaten, die sich unter dem Abkommen von Paris verpflichtet haben, ihre Emissionen zu reduzieren, ihre Klimaziele in Zukunft ambitionierter zu gestalten und Langfriststrategien zur Dekarbonisierung ihrer Wirtschaft zu entwickeln, gibt es für den Luftverkehr aber lediglich ein sehr schwaches Emissionsreduktionsziel. Unter der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization – ICAO) konnten sich die beteiligten Länder bisher lediglich darauf einigen, das Wachstum des Luftverkehrs über das bestehende Niveau hinaus zu begrenzen (siehe Factsheet 2). Ziele zur Reduktion der Emissionen aus dem Luftverkehr sind nicht definiert. Das ist mit den Zielen des Pariser Abkommens, die Erderhitzung auf deutlich unter 2° C Temperaturanstieg zu begrenzen, nicht vereinbar.

2 WIE WIRKEN FLUGEMISSIONEN?

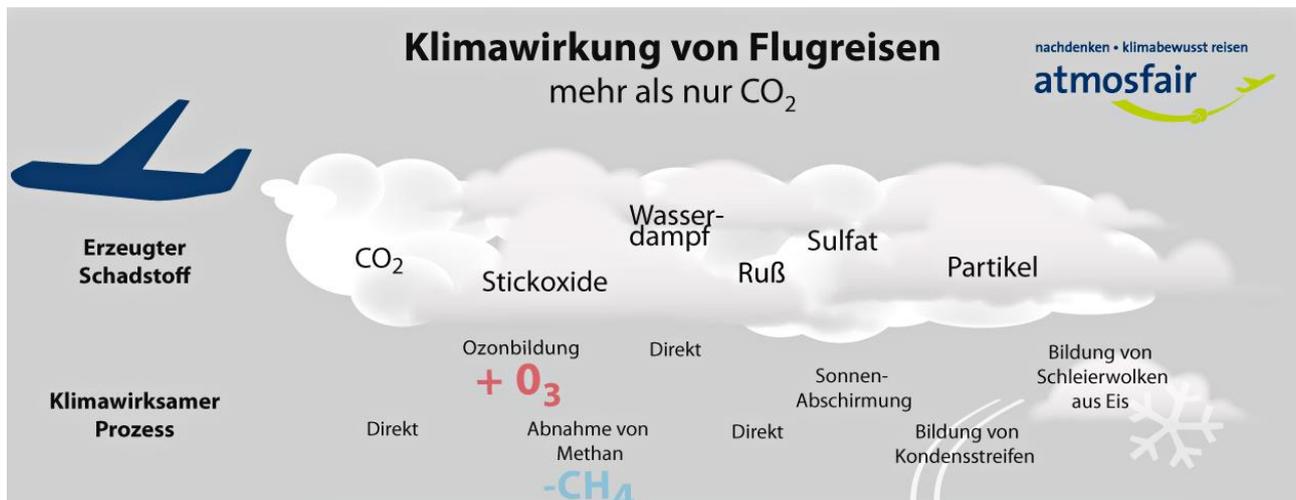
Neben dem direkten Ausstoß von Treibhausgasen hat der Luftverkehr weitere schädliche Auswirkungen auf das Klima durch Wolkenbildung und andere chemische Prozesse (Nicht-CO₂-Effekte) – sie werden durch die alleinige Betrachtung der CO₂-Emissionen, die durch die Verbrennung des Kerosins entstehen, nicht berücksichtigt. Eine 2020 erschienene Studie schätzt, dass die gesamte klimaschädliche Wirkung des Luftverkehrs im globalen Durchschnitt und bei gleichbleibendem Wachstum des Luftverkehrs etwa drei Mal so groß ist wie die der CO₂ Emissionen alleine.

2.1 Wie wirkt der Luftverkehr auf das Klima?

Der Luftverkehr hat stärkere negative Auswirkungen auf das Klima als nur die Wirkung der CO₂-Emissionen. Stickoxide (NO_x), Wasserdampf, Ruß, Aerosol- und Sulfat-Aerosolpartikel, die von Flugzeugen ausgestoßen werden, wirken ebenfalls auf das Klima. Darüber hinaus entstehen beim Fliegen Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren, also Wolken aus Eiskristallen, die von Flugzeugtriebwerken in großer Höhe erzeugt werden können. Dadurch können wärmende ebenso wie kühlende Effekte entstehen.

Stickoxide können zum Beispiel zu Ozonbildung führen, was die Atmosphäre erwärmt. Außerdem können sie zum Abbau von Methan in der Atmosphäre beitragen, was wiederum einen kühlenden Effekt hat. Wasserdampf und Rußpartikel, die Sonnenlicht absorbieren, haben einen direkt wärmenden Effekt. Sulfatpartikel können kühlend wirken, indem sie Sonnenlicht von der Atmosphäre abschirmen. Außerdem können Aerosolpartikel zur Bildung von Kondensstreifen und Schleierwolken aus Eis führen. Die Kondensstreifen fangen Infrarotstrahlung in der Atmosphäre ein und wirken damit wärmend. Zwar reflektieren sie Sonnenstrahlung zurück ins Weltall und können damit kühlend wirken, der wärmende Effekt ist aber stärker. Schleier- oder Zirruswolken aus Eiskristallen absorbieren die Sonnenstrahlung und führen zur Erwärmung der Atmosphäre (DLR 2020b; Lee 2018; Tesche et al. 2016; Bock und Burkhardt 2019).

Abbildung 7: Klimawirkung von Flugreisen: Mehr als nur CO₂



Quelle: atmosfair 2020

Insgesamt überwiegt der wärmende Effekt von Flugemissionen deutlich. Die stärkste Klimawirkung haben die Wolkenbildung und das ausgestoßene CO₂. Die direkte Wirkung der ausgestoßenen Partikel ist physikalisch gut belegt. Wie genau sich die Wolkenbildung auswirkt, ist dagegen noch immer nicht endgültig erforscht (Lee et al. 2020; Lee 2018). Die verschiedenen Effekte wirken außerdem unterschiedlich lange. Während CO₂ über Jahrhunderte in der Atmosphäre bleibt und das Klima erwärmt, wirken Wolkenbildung, Ruß und Aerosole nur über kurz Zeiträume von Tagen bis Dekaden:

Tabelle 1: Wirkung verschiedener Klimafaktoren aus dem Luftverkehr

Klimafaktoren	CO ₂	NO _x -> O ₃ Anstieg	NO _x -> CH ₄ Senkung	NO _x -> O ₃ Senkung	Sulfat Aerosole	Ruß	Kondens- streifen & Zirrus- wolken
Klimawirkung	erwärmend	erwärmend	abkühlend	abkühlend	abkühlend	erwärmend	erwärmend
Dauer	Jahr- hunderte	Wochen bis Monate	Dekaden	Dekaden	Tage bis Wochen	Tage bis Wochen	Kondens- streifen: Stunden Zirrus- wolken: Stunden bis Tage
Räumliche Verbreitung	Global	Kontinental bis global	Kontinental bis global	Kontinental bis global	Kontinental bis global	Lokal bis global	Lokal bis global
Wissen- schaftliche Erkenntnisse	Gut	Mittel	Mittel	Mittel	Direkte Effekte: Gut Indirekte Effekte: Schlecht	Direkte Effekte: Gut Indirekte Effekte: Schlecht	Schlecht

Erläuterungen: NO_x = Stickstoffoxid; O₃ = Ozon; CH₄ = Methan

Quelle: Carbon Offset Guide 2020

2.2 Wie kann die gesamte Klimawirkung gemessen werden?

In manchen Studien wird der Effekt des Luftverkehrs auf die Erde mithilfe des Strahlungsantriebs („radiative forcing“, RF) abgeschätzt. Der Strahlungsantrieb ist ein Parameter dafür wie die Energiebilanz der Erde und der Atmosphäre verändert werden. Zur Berechnung wird hier ein Index für den Strahlungsantrieb („radiative forcing index“, RFI) verwendet, der den Strahlungsantrieb aller Effekte des Luftverkehrs im Verhältnis zu jenem der CO₂-Emissionen betrachtet. Der RFI schätzt, dass die gesamte klimaschädliche Wirkung des Luftverkehrs 1,9 bis 4,7 mal so groß ist wie die Wirkung der CO₂-Emissionen alleine (Grassl und Brockhagen 2007).

In einer 2020 erschienenen Studie wird die Klimawirkung des Luftverkehrs über den sogenannten „effektiven Strahlungsantrieb“ (effective radiative forcing, ERF) gemessen, der die Zunahme oder Abnahme des Gleichgewichts zwischen der von der Sonne kommenden Energie und der von der Erde emittierten Energie seit der Zeit vor der Industrialisierung darstellt (DLR 2020b). **In dieser Studie wird die gesamte Klimawirkung des Luftverkehrs etwa drei mal so hoch geschätzt, wie die der CO₂ Emissionen alleine, wenn der Luftverkehr in Zukunft weiter so stark wächst, wie vor der Covid-19 Pandemie** (Lee et al. 2020). Der ERF ist ein besserer Indikator für den wärmenden Effekt des Luftverkehrs, weil er schnelle Reaktionen des Erdsystems stärker berücksichtigt (Myhre et al. 2013, S. 665).

Für einen einzelnen Flug hängt die spezifische Klimawirkung durch die oben genannten Faktoren von weiteren Parametern ab. Dazu gehört die Flughöhe, die dort herrschende Temperatur und die Feuchtigkeit in der Atmosphäre. Für die Berechnung der Klimawirkung eines einzelnen Flugs ist es wichtig, diese Bedingungen zu berücksichtigen. So kann ein Anreiz geschaffen werden, die klimaschädlichen Wirkungen des Fliegens zum Beispiel dadurch zu reduzieren, dass in niedrigerer Höhe geflogen wird.

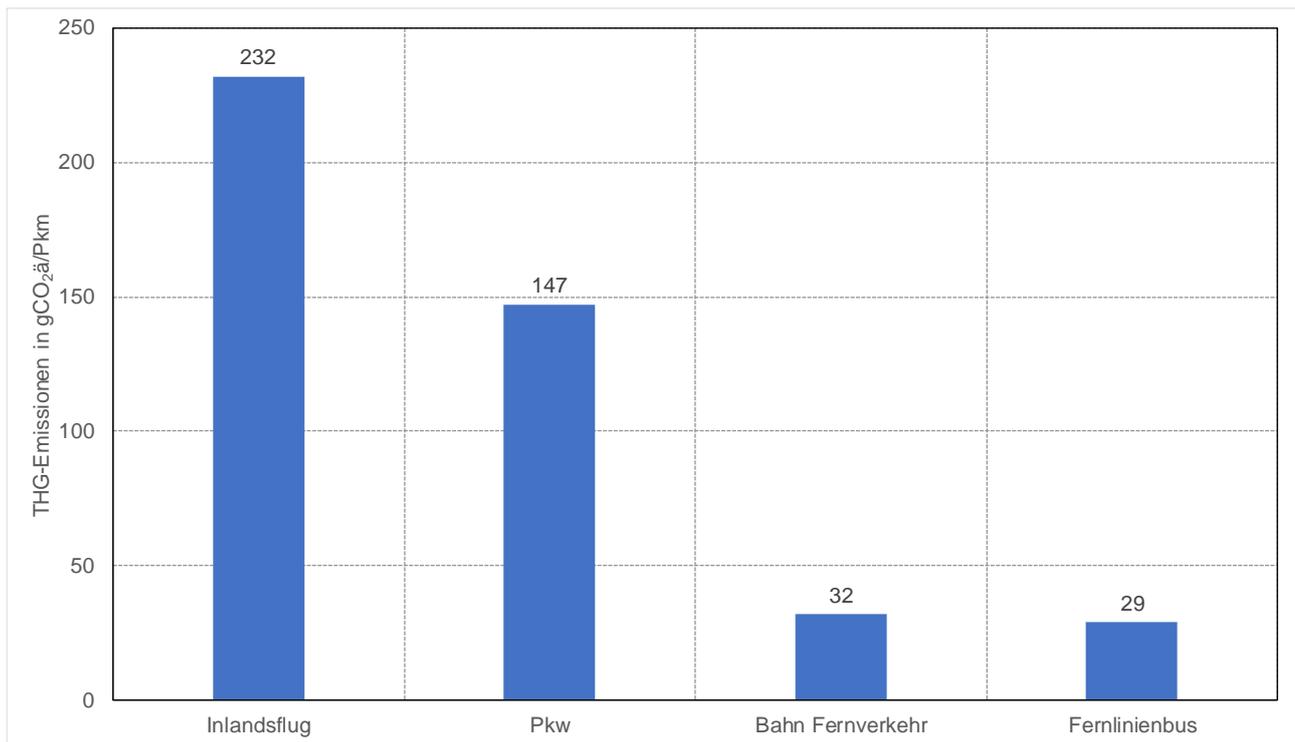
3 VERKEHRSMITTEL IM VERGLEICH

Im direkten Vergleich der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen verschiedener Verkehrsträger wird deutlich, dass Fliegen die größte klimaschädigende Wirkung hat. Die gesamten Treibhausgasemissionen einer Reise setzen sich aus den spezifischen Emissionen und der zurückgelegten Entfernung zusammen.

Aus dem Transport-Emission-Modell des Umweltbundesamtes (TREMOD)¹ ergeben sich für Flüge innerhalb von Deutschland pro Personenkilometer (Pkm) rund sieben bis achtmal so hohe Treibhausgasemissionen wie bei der Nutzung klimafreundlicherer Verkehrsmittel, so etwa von Fernverkehrszügen und Fernlinienbussen. Aber auch im Vergleich zum Pkw liegen die spezifischen Emissionen von Inlandsflügen, also die Emissionen bezogen auf die Verkehrsleistung in Personenkilometer (Pkm), im Durchschnitt fast 60 % höher.

¹ Transport Emission Model Version 6.03

Abbildung 8: Treibhausgasemissionen verschiedener Verkehrsmittel im Vergleich



Erläuterung: Gemittelte Werte für Reisen in Deutschland

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von TREMOD Version 6.03

3.1 Was sind die relevanten Faktoren der Klimabilanz?

Die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer hängen grundsätzlich von mehreren Faktoren ab:

- Vom Energieverbrauch des Fahrzeugs pro Kilometer,
- der Art des genutzten Kraftstoffs bzw. Energieträgers und
- der Kapazität und Auslastung des Fortbewegungsmittels.

Der Energieverbrauch und die Art des Kraftstoffs bestimmen die gesamten Treibhausgasemissionen eines Fortbewegungsmittels. Der **Energieverbrauch** eines Flugzeuges hängt wesentlich von dessen Eigenschaften ab, also etwa dem Flugzeugtyp, der Art der Triebwerke, dem Gewicht des Flugzeugs und seiner Ausstattung. Auch die Flugweise und externe Bedingungen beeinflussen den Energieverbrauch: Wie groß ist die Zuladung? Welche Reisegeschwindigkeit wird gewählt? Wie sind die Umgebungsbedingungen wie etwa der Wind?

Grundsätzlich beeinflussen ähnliche Faktoren auch bei anderen Verkehrsmitteln den Energieverbrauch. Ein Pkw mit einem Ottomotor verbraucht zum Beispiel mehr Energie als ein vergleichbares Fahrzeug mit Dieselmotor. Ein schweres, leistungsstarkes Fahrzeug der Oberklasse verbraucht in der Regel mehr als ein leichter Kompaktwagen. Ein Zug mit elektrischem Antrieb ist effizienter als einer mit Dieselantrieb.

Wie die Art des genutzten **Kraftstoffs** die Treibhausgasemissionen beeinflusst, ist im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig:

- der Menge an Kohlenstoff im Kraftstoff in Bezug zum Energiegehalt – sie bestimmt die direkten CO₂-Emissionen.
- den Emissionen, die bei der Produktion und Bereitstellung des Kraftstoffs, der sogenannten **Vorkette** entstehen.

Vorkette: Der Entstehungsweg eines Produkts. Unter Berücksichtigung der Vorkette werden die direkten Umwelteffekte und die von vorgelagerten Prozessketten ausgehenden Effekte berücksichtigt.

Aus dem TREMOD-Modell des Umweltbundesamtes ergeben sich für 2018 folgende Werte:

- Kerosin: direkte CO₂-Emissionen: 73,3 g CO₂/MJ; Treibhausgasemissionen aus der Vorkette: 15,6 g CO₂ä/MJ.
- Benzin: direkte CO₂-Emissionen: 74,9 g CO₂/MJ; Treibhausgasemissionen aus der Vorkette: 12,4 g CO₂ä/MJ.
- Diesel: direkte CO₂-Emissionen: 73,9 g CO₂/MJ; Treibhausgasemissionen aus der Vorkette: 12,5 g CO₂ä/MJ

Wird etwa im Schienenfernverkehr Strom für den Antrieb genutzt oder ein Flugzeug rein elektrisch betrieben, entstehen keine direkten Emissionen. Die gesamten Emissionen entfallen auf die Stromerzeugung am Kraftwerk und die Vorkette der dort genutzten Energieträger. Wie hoch diese Emissionen ausfallen, hängt dann stark davon ab, wie hoch die Emissionen im Strommix im jeweiligen Land ausfallen, also wie hoch der Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung ist.

Weitere wichtige Faktoren für die Klimabilanz sind die **Kapazität** und **Auslastung** des Fortbewegungsmittels. Die Kapazität wird durch das Flugzeugmodell und die gewählte Bestuhlung bestimmt: Bei geringem Abstand können mehr Passagierinnen und Passagiere transportiert werden, ein größerer Sitzabstand wie etwa in der Businessclass verringert wiederum die Kapazität. Der [Emissionsrechner von Atmosfair](#) berücksichtigt diesen unterschiedlichen Platzbedarf: Er multipliziert zum Beispiel die durchschnittlichen Emissionen mit einem Faktor von 0,8 (Economy-Klasse), 1,5 (Business-Klasse) oder 2 (First Class). First Class-Flügen werden so etwa zweieinhalb Mal so viele Emissionen zugerechnet wie Economy Flügen.

Im Bauch von Passagiermaschinen werden häufig Güter als Bei- oder auch Belly-Fracht transportiert, daher müssen die Emissionen des Flugzeuges auf Fracht sowie Passagierinnen und Passagiere aufgeteilt werden. In der Praxis geschieht dies häufig auf Basis der Verkehrsleistung in Tonnenkilometer, jeder und jede Reisende wird dann mit Gepäck als 100 kg gerechnet (Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. 2013).

Eine geringere Kapazität und/oder Auslastung wie etwa auch im Zuge der Covid-19-Pandemie erhöhen also die umweltschädliche Wirkung eines Flugs pro Person, weil die gesamten Emissionen auf weniger Reisende (und mittransportierte Güter) aufgeteilt werden.

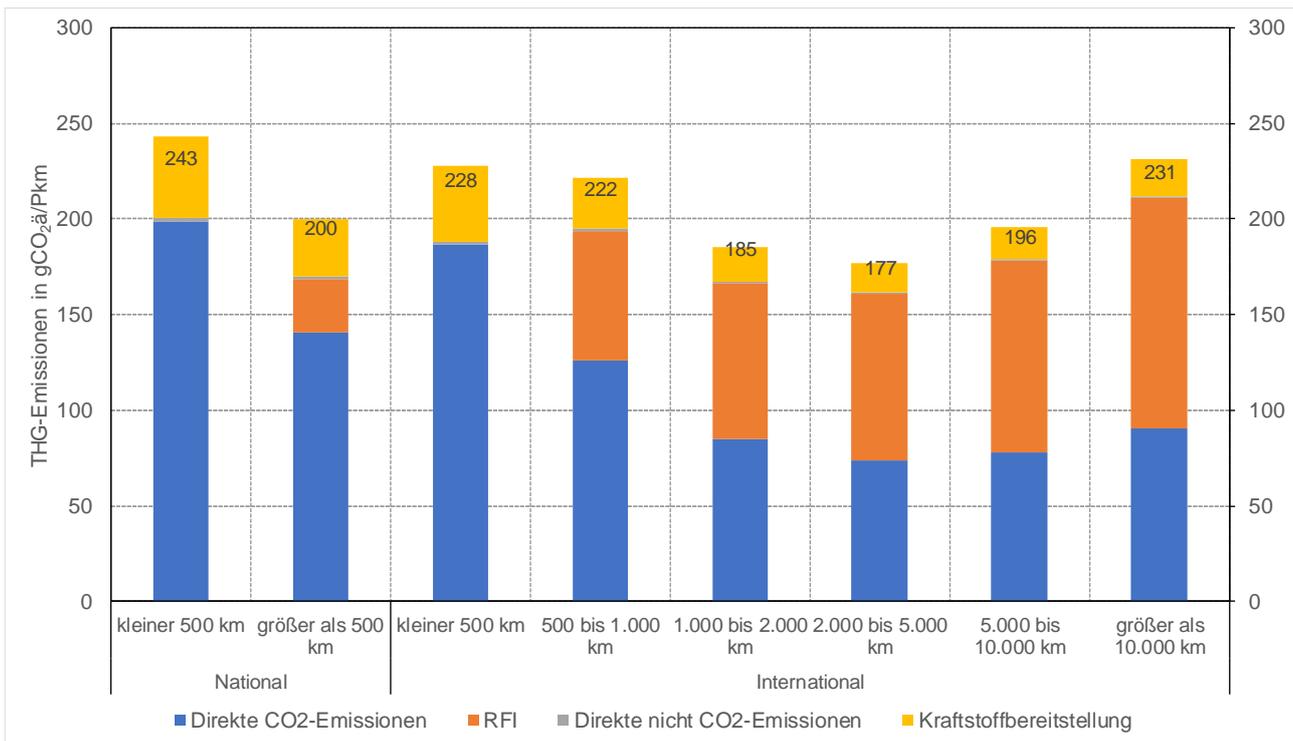
3.2 Was unterscheidet die Treibhausgasemissionen im Luftverkehr?

Im Luftverkehr gibt es einige wesentliche Besonderheiten im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln. So sind die klimawirksamen Emissionen aufgrund mehrerer Mechanismen entfernungsabhängig.

Die Abbildung verdeutlicht, dass bei geringen Distanzen die CO₂-Emissionen den größten Anteil des klimaschädlichen Effekts des Luftverkehrs ausmachen. Der energieintensive Start und Steigflug schlagen bei kurzen Distanzen besonders stark zu Buche. Bei großen Distanzen machen hingegen

die indirekten klimaschädlichen Wirkungen etwa die Hälfte der gesamten Klimawirkung eines Fluges aus, weil die nicht-CO₂-Effekte wie z. B. die wärmenden Effekte durch Wolkenbildung in höheren Flughöhen eine größere Rolle spielen. Allerdings nehmen bei Langstreckenflügen die Emissionen pro Kopf zu, weil mehr Kraftstoff transportiert werden muss und daher weniger Reisende und Belly-Fracht transportiert werden können. Am niedrigsten ist die gesamte klimaschädliche Wirkung – umgerechnet in Treibhausemissionen pro Personenkilometer – bei Distanzen zwischen 1.000 und 5.000 km.

Abbildung 9: Klimawirkung des Luftverkehrs auf verschiedenen Strecken



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von TREMOD Version 6.03

Was beeinflusst die Treibhausgasemissionen im Flugbetrieb?

Startphase und Steigflug, Reiseflughöhe und Kraftstoffmenge haben einen direkten Einfluss auf die Treibhausgasemissionen von Flugzeugen:

1. Die Startphase und der Steigflug

Hierbei verbrauchen Flugzeuge besonders viel Energie, da das Flugzeug beschleunigt wird und die Flughöhe zunimmt. Diese energieintensiven Phasen fallen bei kurzen Strecken mehr ins Gewicht als bei längeren. Der spezifische Energieverbrauch pro Kilometer nimmt durch diesen Effekt mit zunehmender Entfernung ab.

2. Die Reiseflughöhe

Nicht-CO₂-Effekte treten in hohen Reiseflughöhen auf. Je weiter ein Flug ist, desto größer ist der Anteil der Flugstrecke, die in diesen hohen Höhen zurückgelegt wird. Damit steigen die spezifischen Emissionen durch die Nicht-CO₂-Effekte mit zunehmender Entfernung an.

Eine weitere Besonderheit im Luftverkehr: Im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern ist er weniger abhängig von einer liniengebundenen Infrastruktur. In der Praxis ergeben sich dadurch häufig kürzere Wege. Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass sich die geflogene Strecke aus

der direkten Strecke (Großkreisentfernung bzw. Luftlinie auf einer Kugel) und einem gewissen Umweg von z.B. 50 km (Atmosfair) oder 95 km (DIN EN 16258) zusammensetzt. Legt man 50 km zu Grunde, ist die Strecke für Beispielreisen von Frankfurt nach Brüssel, Paris und Barcelona auf dem Landweg zwischen 10 % und 17 % länger als mit dem Flugzeug. Im Luftverkehr kann es also den Vorteil geben, dass eine kürzere Strecke als im Straßen- oder Schienenverkehr zurückgelegt werden muss. Deshalb ist es für einen Vergleich zwischen den Verkehrsmitteln wichtig, nicht nur die Emissionen pro Personenkilometer zu betrachten, sondern mit diesen Werten und den jeweils zurückgelegten Entfernungen die Gesamtemissionen einer Reise zu berechnen.

3. Die Kraftstoffmenge

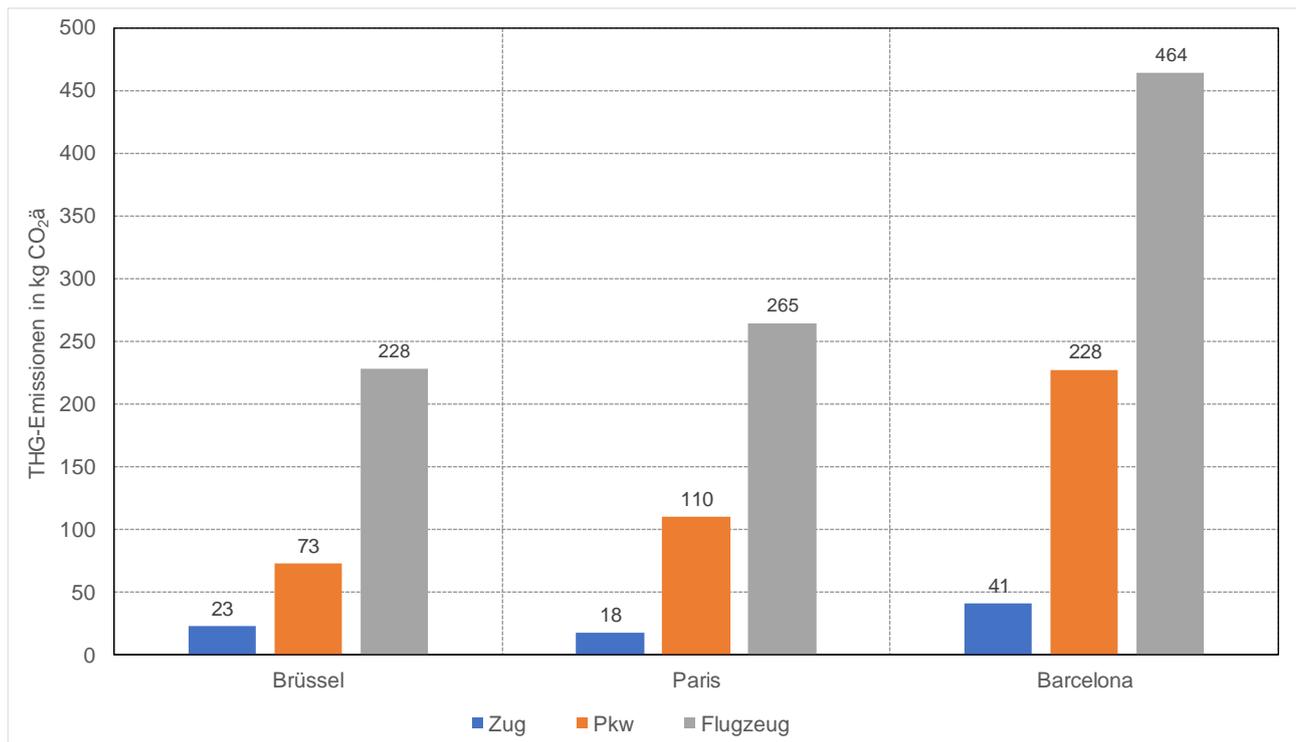
Je weiter das Ziel vom Startpunkt entfernt ist, desto mehr Kraftstoff muss das Flugzeug mit sich führen. Das hat zwei Effekte: Erstens steigt wegen des zusätzlichen Gewichts des Kraftstoffs der Energieverbrauch mit zunehmender Streckenlänge. Zweitens kann sich bei einer gegebenen maximalen Masse, die ein Flugzeug beim Abflug haben darf (*maximum take off weight*, kurz MTOW), wegen der größeren Kraftstoffmenge die mögliche Zuladung von Beifracht verringern. Die Kapazität des Flugzeugs nimmt also ab. Der spezifische Verbrauch beziehungsweise die spezifischen Emissionen pro Personenkilometer steigen so mit zunehmender Entfernung an, weil sich der gesamte Energieverbrauch und die gesamten Emissionen auf eine geringere Nutzlast verteilen.

Es kann bei Langstreckenflügen daher sinnvoll sein, eine Zwischenlandung zum Tanken auf halber Strecke durchzuführen. Bei einer Boeing 777-300 führt dies ab einer Gesamtstrecke von rund 5.500 km zu einer Reduzierung des spezifischen Energieverbrauches (UBA 2019c). Eine Zwischenlandung bringt auf der anderen Seite aber auch höhere bodennahe Luftschadstoffemissionen und Lärmbelastungen mit sich (siehe Kapitel 4).

3.3 Treibhausgasemissionen im Vergleich

Die nachfolgende Abbildung zeigt an Beispielreisen von Frankfurt/Main nach Brüssel, Paris und Barcelona die Treibhausgasemissionen für Zug, Pkw und Flugzeug – jeweils für den Hin- und Rückweg. Die Berechnung wurde mit dem Online-Rechentool [EcoPassenger](#) durchgeführt und berücksichtigt sowohl die Vorketten aus der Kraftstoffbereitstellung als auch die Nicht-CO₂-Effekte von Flügen in großen Höhen. Es wird eine durchschnittliche Auslastung von Flugzeugen und Zügen veranschlagt, beim Pkw wird von einem aktuellen Fahrzeug der Mittelklasse mit Otto-Motor und zwei Reisenden ausgegangen.

Abbildung 10: THG-Emissionen (hin und zurück) einer Reise von Frankfurt a.M. nach ...



Anmerkungen: Zug und Flugzeug: durchschnittliche Auslastung; Pkw: Mittelklasse, Benzin, 2 Personen

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von ecopassenger.org

Der Schienenfernverkehr schneidet in diesem Vergleich am besten ab: Bahnreisende verursachen weniger als 10 % der Treibhausgasemissionen von fliegenden Urlauberinnen und Urlaubern. Die niedrigen Emissionen durch die Bahnreise sind auch Resultat des geringen Anteils an Strom aus Kohlekraftwerken in Frankreich. Pkw-Reisende verursachen auf der kurzen Strecke nach Brüssel etwa zwei Drittel geringere Treibhausgasemissionen als Flugreisende. Bei der längeren Reise nach Barcelona sinkt ihr Emissionsvorteil gegenüber dem Flugzeug auf rund die Hälfte.

Durch die hohe Geschwindigkeit von Flugzeugen ermöglicht das Fliegen zudem Reisen zu weit entfernten Zielen, die mit anderen Verkehrsmitteln nicht oder nur dann erreicht werden können, wenn die deutlich längere Reisezeit kein Hindernis darstellt. Solche durch den Luftverkehr möglich gewordenen Fernreisen verursachen sehr hohe Treibhausgasemissionen. Für eine Reise nach Südostasien mit einer Flugdistanz von rund 9.000 km fallen zum Beispiel über 6 t CO₂e an (Berechnungen mit <http://ecopassenger.org>).

4 LUFTSCHADSTOFFE UND LÄRM

Neben seiner klimaschädlichen Wirkung hat der Luftverkehr weitere negative Auswirkungen. So belasten Lärm und Luftschadstoffe Mensch und Umwelt.

4.1 Luftschadstoffe

Durch den Flugbetrieb und Aktivitäten am Flughafen werden – wie bei anderen Verkehrsträgern auch - Schadstoffe wie Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Feinstaub freigesetzt. Sie haben nicht

nur wärmende Wirkungen auf das Klima, sondern können sich auch negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken (IASS 2013).

Im Zusammenhang mit dem Luftverkehr wird aktuell insbesondere die Wirkung ultrafeiner Partikel (UFP) diskutiert – also Partikel, die kleiner als 100nm sind. Diese entstehen grundsätzlich bei allen Verbrennungsprozessen. Durch Flugzeugtriebwerke werden besonders große Mengen ultrafeiner Partikel freigesetzt. Diese sorgen in der Nähe von Flughäfen für erhöhte Ultrafeinstaubkonzentrationen (UBA 2018b; Universitätsklinikum Düsseldorf 2018; UBA 2019b, S. 18). Es sollten daher nicht nur Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden, sondern auch Maßnahmen zur Minderung von Luftschadstoffen und damit potenzielle Gesundheitsgefahren.

4.2 Lärm

Studien konnten einen deutlichen Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und Erkrankungsrisiken feststellen. Vor allem in Ballungsgebieten leiden die Menschen unter Lärm.

Um den negativen gesundheitlichen Auswirkungen von Fluglärm zu begegnen sind sowohl aktive als auch passive Schallschutzmaßnahmen möglich. Der aktive Schallschutz zielt darauf ab, den Lärm durch technische Maßnahmen direkt an der Quelle zu reduzieren: Es können Flugrouten angepasst oder Routen und Bahnen zeitlich anders genutzt werden; neue Flugverfahren machen es außerdem möglich, beim Anflug länger in größeren Höhen zu fliegen, um den Lärm am Boden zu reduzieren oder Flugrouten genauer abzufliegen. Passive Schallschutzmaßnahmen schützen Menschen durch bauliche Maßnahmen wie z.B. einer besseren Schalldämmung von Gebäudebestandteilen (z.B. Fenster oder Dächer).

Die Regelungen des Fluglärmschutzgesetzes setzen den Schwerpunkt auf passive Schallschutzmaßnahmen, Siedlungsbeschränkungen für besonders betroffene Gebiete oder Entschädigungszahlungen für die eingeschränkte Nutzungsmöglichkeiten des Außenwohnbereichs. Aktiver Schallschutz wird deshalb oftmals vernachlässigt und die technologischen und navigatorischen Möglichkeiten nicht genutzt. Die gesetzlich vorgesehenen Schwellenwerte für passiven Schallschutz sind außerdem nicht ausreichend: sowohl die kurzfristige Belästigung als auch die langfristigen Auswirkungen von Fluglärm sind größer als bei Festsetzung der gesetzlichen Werte angenommen wurde. (Öko-Institut und GeräuscheRechner 2018).

Das Projekt „Über den Wolken oder am Boden bleiben? Das Verhältnis von Luftverkehr und Klimaschutz“ wurde über Spenden finanziert. Alle Informationen stehen auf der Website www.fliegen-und-klima.de zur Verfügung.

Kontakt zum Öko-Institut

Projektleitung	Zum Thema Klimawirkung
<p>Anne Siemons Senior Researcher Energie & Klimaschutz</p> <p>Öko-Institut e.V., Geschäftsstelle Freiburg Tel.: +49 761 45295-290 E-Mail: a.siemons@oeko.de</p>	<p>Jakob Graichen Senior Researcher Energie & Klimaschutz</p> <p>Öko-Institut e.V., Büro Berlin Tel.: +49 30 405085-366 E-Mail: j.graichen@oeko.de</p>
Zum Thema Verkehrsmittel im Vergleich	Zum Thema Luftschadstoffe und Lärm
<p>Moritz Mottschall Senior Researcher Ressourcen & Mobilität</p> <p>Öko-Institut e.V., Büro Berlin Tel.: +49 30 405085-377 E-Mail: m.mottschall@oeko.de</p>	<p>Christoph Brunn Stv. Bereichsleiter Umweltrecht & Governance</p> <p>Öko-Institut e.V., Büro Darmstadt Tel.: +49 6151 8191 128 E-Mail: c.brunn@oeko.de</p>

Das Öko-Institut ist eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungsinstitute für eine nachhaltige Zukunft. Seit der Gründung im Jahr 1977 erarbeitet das Institut Grundlagen und Strategien, wie die Vision einer nachhaltigen Entwicklung global, national und lokal umgesetzt werden kann. Das Institut ist an den Standorten Freiburg, Darmstadt und Berlin vertreten.

5 LITERATURVERZEICHNIS UND WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

- Agora Verkehrswende (2020): KWC GmbH. Railmap 2030: Bahnpolitische Weichenstellungen für die Verkehrswende. Online verfügbar unter https://static.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Bahnpolitische_Weichenstellungen/35_Railmap_lan_g_WEB.pdf.
- Airbus (2019): Cities, airports & aircraft 2019-2038. Global Market Forecast. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>.
- atmosfair (2020): Klimawirkung des Flugverkehrs. Online verfügbar unter https://www.atmosfair.de/wp-content/uploads/klimawirksamkeit_des_flugverkehrs.pdf.
- Banister, D. (2018). Inequality in Transport. Alexandrine Press, Oxfordshire.
- BDL (2017): Was wird eigentlich per Luftfracht transportiert? Online verfügbar unter <https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2018/09/bdl-luftfahrtaktuell-2017-4.pdf>.
- BDL (2018): Wofür braucht es innerdeutschen Luftverkehr? Online verfügbar unter <https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2018/09/bdl-luftfahrtaktuell-2018-2.pdf>.
- BDL (2020): Jahresbilanz 2019: Zur Lage der deutschen Luftverkehrswirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2020/02/BDL-Jahreszahlen-2019.pdf>.
- Bleijenberg, A. (2020): Air2Rail: Reducing CO2 from intra-European aviation by a modal shift from air to rail. Online verfügbar unter https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_03_Air2Rail_Koios_strategy_rev.pdf.
- BMU (2020): Fluglärm. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/laermschutz/themenbereiche-laerm/fluglaerm/>.
- BMVI (2019): Verkehr in Zahlen 2019/2020. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-pdf.pdf?__blob=publicationFile.
- Bock, L.; Burkhardt, U. (2019): Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 19 (12), S. 8163–8174. DOI: 10.5194/acp-19-8163-2019.
- BUND e.V. (2019): Kurzstreckenflüge auf die Schiene verlagern. Eine Strategie für Klimaschutz durch weniger Flugverkehr. Online verfügbar unter https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/mobilitaet_verlagerung_kurzstreckenfluege_schiene_kurzinfo.pdf.
- Bundeswehr (2020): Militärischer Flugbetrieb: Informationen und Hintergründe. Online verfügbar unter <https://www.bundeswehr.de/resource/blob/175358/6df20b907ab1611735c1929f8bdbef3e/broschuere-fliz-data.pdf>.
- Carbon Offset Guide (2020): Total climate impacts from aviation. Online verfügbar unter <https://www.offsetguide.org/understanding-carbon-offsets/air-travel-climate/climate-impacts-from-aviation/total-climate-impact-from-aviation/>.
- Destatis (2020a): Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen - Fachserie 8 Reihe 6.1 - 2019. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/Publikationen/Downloads-Luftverkehr/luftverkehr-ausgewaehlte-flugplaetze-2080610197004.pdf;jsessionid=2557CDDDAD9574A1C74A802D0820521F.internet8722?__blob=publicationFile.

- Destatis (2020b): Luftfracht in der Corona-Krise: Vergleichsweise moderater Rückgang von 12,1% im Zeitraum März bis Mai 2020 gegenüber Vorjahr, Pressemitteilung. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/07/PD20_N040_461.html.
- Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (2013): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. Online verfügbar unter [https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/\\$file/DSLVL-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf](https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/8F102DF8C3E4A2F141257BB7007779CB/$file/DSLVL-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20Stand%2003-2013.pdf).
- DFS (2020): Stagnation statt Erholung. Online verfügbar unter https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Presse/Pressemitteilungen/2020/30.09.2020.-%20Stagnation%20statt%20Erholung/.
- DLR (2020a): 2020 weniger Urlaubsflüge ab Deutschland. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2020/01/20200302_touristischer-luftverkehr-schrumpft.html.
- DLR (2020b): Der globale Luftverkehr trägt 3,5 Prozent zur Klimaerwärmung bei, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2020/03/20200903_der-globale-luftverkehr-traegt-3-5-prozent-zur-klimaerwaermung-bei.html.
- EEA - European Environment Agency (2020): EEA. EEA greenhouse gas data viewer. European Environment Agency. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>.
- EEA (2019): Passenger and freight transport demand in Europe. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/passenger-and-freight-transport-demand/assessment-1>.
- EIB (2019): Weniger fliegen, weniger fahren: für Europa eine Option. Zweite Umfrage der EIB zum Klimawandel (3/3). Online verfügbar unter <https://www.eib.org/de/surveys/2nd-climate-survey/climate-action-and-policy-solutions.htm>.
- Eurocontrol (2020): Traffic scenarios. Online verfügbar unter <https://www.eurocontrol.int/covid19>.
- European Court of Auditors (2018): A European high-speed rail network. Special report No 19/2018. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/high-speed-rail-19-2018/en/>.
- Gössling, S.; Humpe, A. (2020): The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. *Global Environmental Change* 65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>.
- Gössling, S. (2019): Stellvertreter-Debatte oder große Sünde: Wie schlimm ist fliegen? Interview im Deutschlandfunk, 10.07.2019. Online verfügbar unter https://www.deutschlandfunk.de/umweltdebatte-wie-schlimm-ist-fliegen.2011.de.html?dram:article_id=453425.
- Gössling, S.; Ceron, J.-P.; Dubois, G.; Hall, M. C. (2009): Hypermobile travellers. In: Gössling, S. und Upham, P. (Hg.): *Climate change and aviation: Issues, challenges and solutions*. London: Earthscan, S. 131–150.
- Grassl, H.; Brockhagen, D. (2007): Climate forcing of aviation emissions in high altitudes and comparison of metrics. An update according to the Fourth Assessment Report, IPCC. Online verfügbar unter https://mpimet.mpg.de/fileadmin/download/Grassl_Brockhagen.pdf.
- Henley & Partners (2020): Passport Index - Global Ranking 2020. Online verfügbar unter <https://www.passportindex.org/byRank.php>.

- IASS - Institute for Advanced Sustainability Studies (2013): Gefahr für Gesundheit und Klima: Kurzlebige klimawirksame Schadstoffe. Online verfügbar unter https://publications.iass-potsdam.de/rest/items/item_309868_10/component/file_896910/content.
- IATA (2019): WATS - World Air Transport Statistics 2019. Online verfügbar unter <https://airlines.iata.org/data/in-numbers-world-air-transport-statistics-2019>.
- IATA (2020a): Air cargo capacity crunch: Demand plummets but capacity disappears even faster. Online verfügbar unter <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-06-02-01/>.
- IATA (2020b): Economic performance of the airline industry. Online verfügbar unter <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industry-economic-performance-june-2020-report/>.
- IATA (2020c): Recovery delayed as international travel remains locked down. Online verfügbar unter <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-07-28-02/>.
- ICAO (2018): ICAO long-term traffic forecasts. Passenger and cargo. Online verfügbar unter https://www.icao.int/sustainability/documents/ltf_charts-results_2018edition.pdf.
- ICAO (2019): World of Air Transport in 2018. Online verfügbar unter <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx>.
- ICAO (2020): Effects of novel Coronavirus (Covid-19) on civil aviation: Economic impact analysis. Online verfügbar unter https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf.
- Ivanova, D.; Wood, R. (2020): The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. In: *Global Sustainability* 3, S. 1–12. DOI: 10.1017/sus.2020.12.
- Kranke, A.; Schmied, M.; Schön, A. D. (2011): CO₂-Berechnung in der Logistik, Datenquellen, Formeln, Standards 1. Auflage (Verkehrs-Rundschau). München: Vogel.
- Lassen, C. (2016): Aeromobility and Work. In: *Environment and Planning A* 38 (2), S. 301–312. DOI: 10.1068/a37278.
- Lee, D. S. (2018): The current state of scientific understanding of the non-CO₂ effects of aviation on climate. Online verfügbar unter https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/813342/non-CO2-effects-report.pdf.
- Lee, D. S.; Fahey, D. W.; Skowron, A.; Allen, M. R.; Burkhardt, U.; Chen, Q.; Doherty, S. J.; Freeman, S.; Forster, P. M.; Fuglestedt, J.; Gettelman, A.; León, R. R. de; Lim, L. L. et al. (2020): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 117834. DOI: 10.1016/J.ATMOENV.2020.117834.
- Myhre, G.; D. Shindell; F.-M. Bréon; W. Collins; J. Fuglestedt; J. Huang; D. Koch; J.-F. Lamarque; D. Lee; B. Mendoza; T. Nakajima; A. Robock, et al. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. Stocker, T. F.; D. Qin; G.-K. Plattner; M. Tignor; S.K. Allen; J. Boschung; A. Nauels et al. (Hg.). Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf.
- Official Aviation Guide (2020): Busiest routes 2019: See the world's busiest international and domestic routes. Online verfügbar unter <https://www.oag.com/reports/busiest-routes-2019>.
- Öko-Institut (2020): Should CORSIA be changed due to the COVID-19 crisis? Öko-Institut. Berlin, 2020. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Should-CORSIA-be-changed-due-to-the-COVID-19-crisis.pdf>.

- Our World in Data (2020): Where in the world do people have the highest CO₂ emissions from flying? Online verfügbar unter <https://ourworldindata.org/carbon-footprint-flying>.
- Stay Grounded (2020): It's about more than just CO₂. Online verfügbar unter https://stay-grounded.org/wp-content/uploads/2020/10/SG_Factsheet_Non-CO2_2020.pdf.
- T&E - Transport & Environment (2020): Big airline polluters grew emissions in 2019 ahead of expected COVID drop. Online verfügbar unter <https://www.transportenvironment.org/press/big-airline-polluters-grew-emissions-2019-ahead-expected-covid-drop>.
- Tesche, M.; Achtert, P.; Glantz, P.; Noone, K. J. (2016): Aviation effects on already-existing cirrus clouds. In: *Nature communications* 7 (12016). DOI: 10.1038/ncomms12016.
- The World Bank (2019): Air transport, passengers carried. Online verfügbar unter <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR>.
- UBA (2020a): Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-bewertung-von-verkehrsarten>.
- UBA (2020b): Emissionen des Verkehrs. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>.
- UBA (2019a): Fliegen (Magazin des Umweltbundesamtes, 2/2019). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkt-2-2019-fliegen>.
- UBA (2019b): Wohin geht die Reise? Luftverkehr der Zukunft: umweltschonend, treibhausgasneutral, lärmarm. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wohin-geht-die-reise-aktualisierte-fassung>.
- UBA (2019c): Umweltschonender Luftverkehr, lokal-national-international (UBA Texte, 130/2019). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschonender-luftverkehr>.
- UBA (Hg.) (2018a): infras. Szenario Luftverkehr Deutschland unter Einbezug von Umweltaspekten (Texte, 109/2018). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/szenario-luftverkehr-deutschland-unter-einbezug-von>.
- UBA (2018b): Fragen und Antworten: Ultrafeine Partikel. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/feinstaub/fragen-antworten-ultrafeine-partikel>.
- Universitätsklinikum Düsseldorf (2018): Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine. Health effects of ultrafine particles. Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting (Umwelt und Gesundheit, 05). Universitätsklinikum Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/health-effects-of-ultrafine-particles>.
- Zeit Online (2019): Verzicht rettet die Welt nicht. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/zeit-wissen/2019/03/flugreisen-klimaschutz-gewissen-co2-emissionen-treibhausgase>.