



KLIMAWIRKUNG DES LUFTVERKEHRS

Wissenschaftlicher Kenntnisstand,
Entwicklungen und Maßnahmen



Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 2.7-Kraftstoffe und Energie im Verkehr
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

Autorinnen und Autoren:

K. Dahlmann, S. Matthes,
Institut für Physik der Atmosphäre
M. Plohr,
Institut für Antriebstechnik
M. Niklaß, J. D. Scheelhaase, F. Wozny,
Institut für Luftverkehr
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
www.dlr.de

Redaktion:

Reinhard Herbener
Fachgebiet I 2.7-Kraftstoffe und Energie im Verkehr
Frank Wetzel
Fachgebiet I 2.2-Schadstoffminderung und
Energieeinsparung im Verkehr
Kay Köhler
Fachgebiet V 3.6-Luftverkehr
Umweltbundesamt
F. Linke, A. Lau,
DLR, Institut für Luftverkehr

Satz und Layout:

CD Werbeagentur GmbH, Troisdorf, www.cdonline.de

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Titel: Adobe Stock, JuergenL; Seite 6: Adobe Stock,
shutter-hold; Seite 10-11: AdobeStock, Sved Oliver; Seite
24-25: Adobe Stock, Kowit; Seite 28-29: DLR; Seite 40-41:
Adobe Stock, Animaflora PicsStock; Seite 46-47: Adobe
Stock, oatawa

Stand: Oktober 2023

ISSN 2363-832X



KLIMAWIRKUNG DES LUFTVERKEHRS

**Wissenschaftlicher Kenntnisstand,
Entwicklungen und Maßnahmen**

Abbildungen

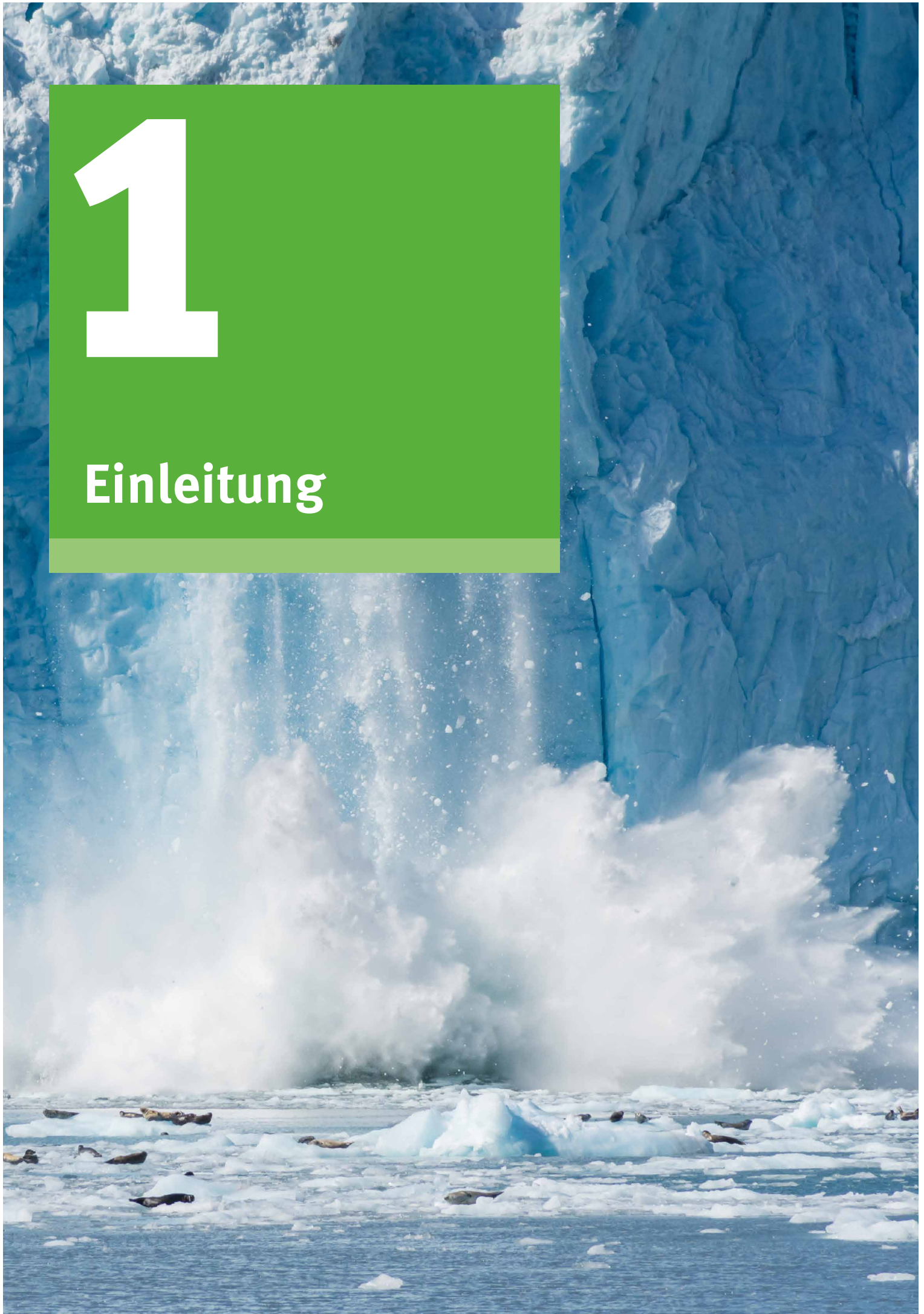
Abbildung 1	
Zeitliche Entwicklung der CO₂-Emissionen und der Passagierkilometer	7
Abbildung 2	
Strahlungsbilanz der Atmosphäre	12
Abbildung 3	
Wirkung der Luftverkehrsemissionen auf das Klima	13
Abbildung 4	
Globale Verteilung der Luftverkehrsemissionen 2019	15
Abbildung 5	
Anteil des CO₂ am gesamten effektiven Strahlungsantrieb des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018	16
Abbildung 6	
Kondensstreifen hinter einer A321	17
Abbildung 7	
Anteil der Kondensstreifen-Zirren am gesamten effektiven Strahlungsantriebs des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018	18
Abbildung 8	
Anteil der Stickoxide am gesamten effektiven Strahlungsantrieb des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018	19
Abbildung 9	
Anteil des Wasserdampfs am gesamten effektiven Strahlungsantriebs des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018	21
Abbildung 10	
Wirkung globaler Emissionen des Luftverkehrs auf die heutige Strahlungsbilanz	22
Abbildung 11	
Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderung der einzelnen Spurenstoffe des bisherigen Luftverkehrs bis zum Jahr 2019	23
Abbildung 12	
Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderung der verschiedenen Klimaspezies für eine Emission im Jahr 2000	26
Abbildung 13	
Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs	30
Abbildung 14	
Konzept eines Open Rotor Triebwerks	34
Abbildung 15	
Beispiel für ein Flugzeugkonzept mit verteilten Antrieben	35
Abbildung 16	
Prinzip der Power-to-Liquid (PtL) Kraftstoffe	36
Abbildung 17	
Formationsflug: Das hintere Flugzeug „surft“ auf dem Luftstrom der Wirbelschleppe	37
Abbildung 18	
Klimaoptimierte Flugführung	39
Abbildung 19	
Anteil an SAF gemäß Vorschrift ReFuel EU Aviation	43
Abbildung 20	
Grundprinzip eines CO₂-Emissionshandels	45

Inhalt

1	1 Einleitung	6
2	2 Klimawirkung des Luftverkehrs	10
	2.1 Emissionen	12
	2.2 Atmosphärische Änderungen	15
	2.3 Resultierende Klimawirkung	22
3	3 Vergleich der Klimawirkung	24
4	4 Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs	28
	4.1 Energieeffizientes Flugzeug	30
	4.2 Emissionsarme Antriebe	33
	4.3 Alternative Kraftstoffe	36
	4.4 Emissionsreduziertes Lufttransportsystem	37
5	5 Politische Maßnahmen	40
6	6 Handlungsmöglichkeiten der Reisenden: Was kann jede/r Einzelne tun?	46
7	7 Zusammenfassung	50

1

Einleitung



1. Einleitung

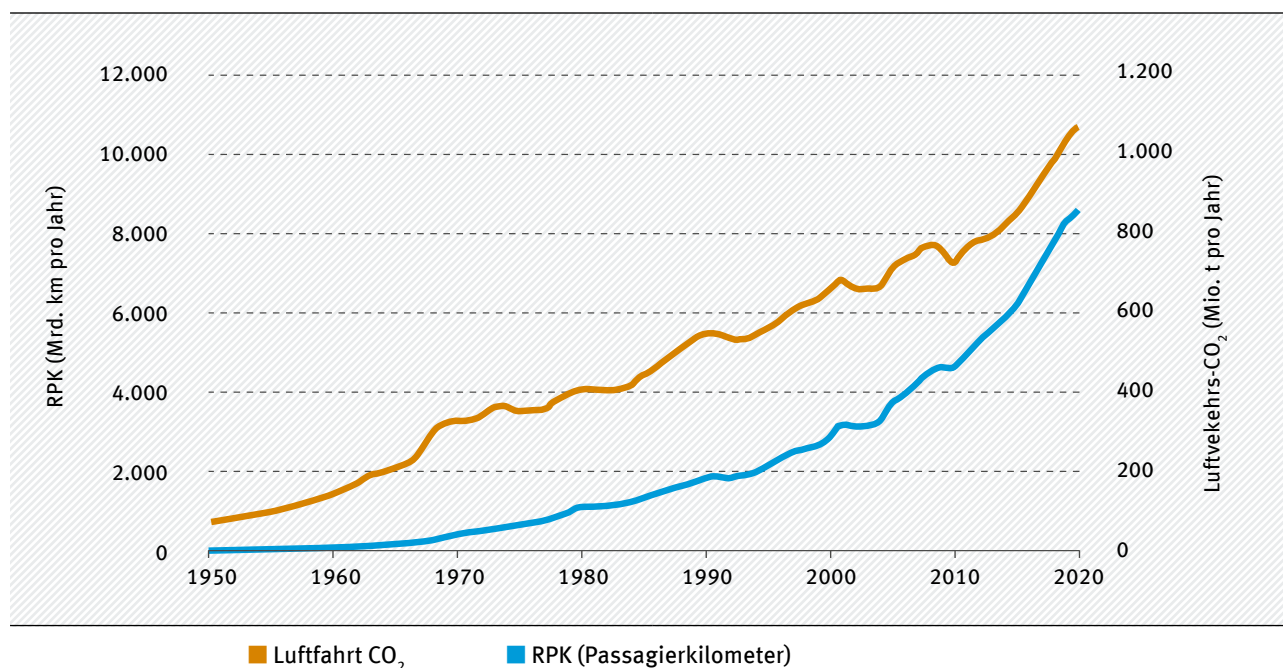
Seit einigen Jahren rückt der vom Menschen verursachte Klimawandel immer stärker in den Blickpunkt der Öffentlichkeit. Um die Erderwärmung gemäß Pariser Klimaabkommen unter 1,5 °C zu beschränken, müssen die globalen Emissionen drastisch reduziert werden.¹

2018 lag der Beitrag des Luftverkehrs zur vom Menschen verursachten Kohlendioxidemission (CO₂) weltweit bei etwa 2,5 %. Der weltweite Luftverkehr war in den letzten Jahrzehnten eine stark wachsende Branche und es wird erwartet, dass er auch in Zukunft wächst. So hat sich seit 1980 das weltweite Aufkommen an Passagierkilometern alle 15 Jahre verdoppelt (Wachstum von etwa 5 %/Jahr, Abbildung 1, Revenue Passenger Kilometers (RPK)).

Infolge des hohen Luftverkehrswachstums stiegen auch die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs kontinuierlich an, allerdings mit deutlich geringerer Geschwindigkeit als die RPK (Abb. 1). Grund für das geringere Wachstum der CO₂-Emissionen sind Verbesserungen durch neue Flugzeuge, ein effizienterer Flugbetrieb, sowie eine höhere Auslastung vorhandener Plätze und eine engere Bestuhlung der Flugzeuge. Allerdings reichten diese Maßnahmen nicht aus, um das Emissionswachstum

Abbildung 1

Zeitliche Entwicklung der CO₂-Emissionen und der Passagierkilometer



Quelle: Eigene Darstellung, DLR, basierend auf Daten von Lee et al., 2021

¹ Um das Ziel von längerfristig nicht mehr als 1,5 °C globaler Erwärmung zu halten, müssen die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 43 % gegenüber 2019 sinken, bis 2035 müssen sie um global 60 % sinken (IPCC, 2023).

aufgrund der gestiegenen Nachfrage zu kompensieren. Der CO₂-Ausstoß stieg trotz dieser Verbesserungen um durchschnittlich 3,7 % pro Jahr.

Neben CO₂-Emissionen spielen im Luftverkehr auch Nicht-CO₂-Klimaeffekte eine besondere Rolle. Einer der offensichtlichsten Effekte ist die Bildung von Kondensstreifen, die am Himmel sichtbar sind. Die in den herkömmlichen Flughöhen vorliegenden atmosphärischen Bedingungen begünstigen bestimmte Prozesse (Wolkenbildung) und chemische Reaktionen (u.a. Ozonproduktion). Betrachtet man die gesamte Wirkung aller bisherigen Luftverkehrsemissionen auf die aktuelle Strahlungsbilanz der Atmosphäre, so werden annähernd zwei Drittel von Nicht-CO₂-Effekten verursacht.²

Besonders relevant dabei sind die Ozonproduktion durch die Stickoxidemission (NO_x) der Flugzeuge und die Bildung von langlebigen Kondensstreifen, sog. Kondensstreifen-Zirren, die nicht unmittelbar mit dem Kraftstoffverbrauch zusammenhängen und den größten Anteil an den Nicht-CO₂-Effekten haben. So hängt die Wirkung der einzelnen Klimaspezies³ neben der Menge der Emissionen auch von anderen Faktoren ab, wie zum Beispiel örtlichen und meteorologischen Bedingungen (z.B. Temperatur, Feuchte, Hintergrundkonzentration verschiedener Spurenstoffe in der Atmosphäre und Sonnenstand). Daher kann das Ausmaß der Nicht-CO₂-Effekte je nach Flugzeugtyp, Flugregion, Höhe und aktuellem Wetter sehr unterschiedlich sein.

Eine Möglichkeit vor allem die CO₂-Emissionen über die oben genannten Maßnahmen hinaus weiter zu reduzieren, ist die Verwendung synthetischer Kraftstoffe, die aus Biomasse oder mithilfe von Strom aus erneuerbarer Energie erzeugt werden. CO₂-Emissionen aus diesen Kraftstoffen können aber nur dann als CO₂-neutral gewertet werden, wenn nur die Mengen an CO₂ ausgestoßen werden, die zuvor durch Pflanzenwachstum oder technische Verfahren aus der Atmosphäre entnommen wurden und auch durch die Weiterverarbeitung der Kraftstoffe keine klimaschädlichen Emissionen verursacht werden. Ein weiterer Vorteil synthetischer Kraftstoffe ist, dass bei der Verbrennung im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen weniger Ruß- und Sulfatpartikel ausgestoßen werden. Dadurch wird der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen, und somit von Nicht-CO₂-Effekten, zusätzlich verringert. Der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen ist derzeit allerdings durch die aktuell noch eher geringen Produktionskapazitäten stark limitiert.

² Dies gilt für den Effektiven Strahlungsantrieb (ERF) aller historischer Luftverkehrsemissionen bis 2018. Der Anteil der Nicht-CO₂ Effekte an der Gesamtklimawirkung hängt aber stark davon ab, welche Metrik verwendet wird. Dies wird in Abschnitt 3 genauer erläutert.

³ Unter Klimaspezies versteht man die unterschiedlichen Komponenten der Klimawirkung, also z.B. Kohlendioxid, Ozon, Methan, Kondensstreifen und Wasserdampf.

Eine effektive Minderung aller Klimaeffekte des Luftverkehrs erfordert mehr als eine reine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der Emissionsmengen von CO₂, Stickoxiden und Wasserdampf. So zeigen neuere Studien, dass Nicht-CO₂-Effekte besonders effektiv durch individuelle Flugrouten- und Flughöhenoptimierungen reduziert werden können. In manchen Regionen wirken Flugzeugemissionen stärker auf das Klima (z.B. in großen Höhen) als in anderen. Werden solche Gebiete gezielt umflogen, kann die Bildung langlebiger Kondensstreifen-Zirren vermieden werden. Zwar erhöht das Ausweichen die CO₂-Emissionen, aber die resultierende Klimawirkung kann in vielen Fällen dennoch deutlich reduziert werden.

Aktuell wird die Routenplanung der Fluggesellschaften unter Kostenaspekten optimiert. Eine Minimierung der CO₂-Emissionen ist für die Fluggesellschaft von Vorteil, da sie mit einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen Kosten einhergeht. Da derzeit noch kein Verfahren zur Reduktion und Messung von Nicht-CO₂-Effekten etabliert ist, werden diese bei der Routenplanung noch nicht berücksichtigt. Die Beschaffung von neuen Flugzeugen orientiert sich an wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die stetige Verbesserung der Flugzeuge und des Kraftstoffverbrauchs führen dabei zu einer kontinuierlichen Reduzierung der Emissionen pro Flug. Durch gezielte Förderung von Technologien und verfügbaren Handlungsoptionen könnte die Entwicklung marktfähiger und gleichzeitig klimafreundlicherer Flugzeuge beschleunigt werden. Ein möglicher zusätzlicher Anreiz wäre, die Klimawirkung der Luftfahrt anhand wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse regulatorisch zu adressieren. Dies geschieht zum Beispiel im EU-Emissionshandel, wobei hierbei bisher nur die CO₂-Emissionen berücksichtigt werden.

Aber auch das Verhalten der Reisenden kann dazu führen, dass Passagiere klimafreundlicher fliegen, indem sie bei der Wahl der Airlines gezielt auf deren Klimaverträglichkeit achten und sich für Anbieter entscheiden, die durch technische und operative Maßnahmen ihre Klimawirkung stärker begrenzen als andere.

Klimawirkung des Luftverkehrs



2

Emissionen

Atmosphärische Änderungen

Resultierende Klimawirkung



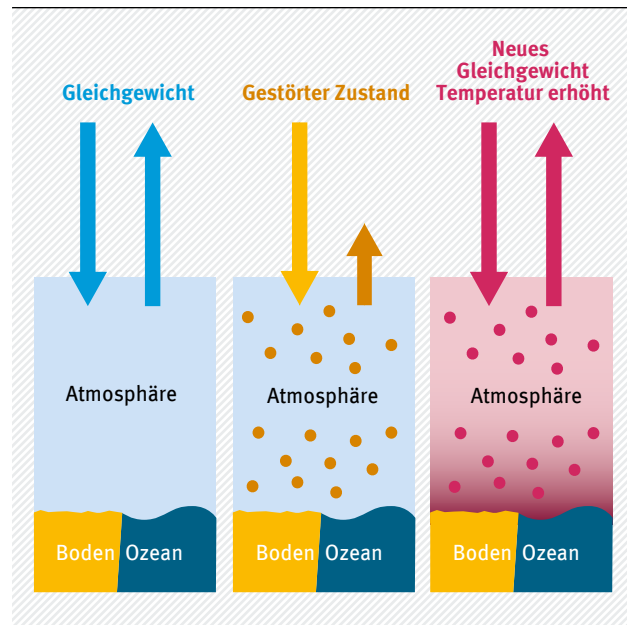
Klimawirkung des Luftverkehrs

Ohne vom Menschen verursachte Emissionen befindet sich die Erde im Strahlungsgleichgewicht: Die Atmosphäre verliert durch Abstrahlung in das Weltall genauso viel Energie, wie sie durch Einstrahlung von Sonnenstrahlung erhält (Abbildung 2). In dieses Gleichgewicht wird durch vom Menschen verursachte Emissionen eingegriffen. Durch die Erhöhung der Konzentration von Treibhausgasen, zum Beispiel, wird ein Teil der langwelligen Strahlung in der Atmosphäre zurückgehalten. Dadurch kann weniger Strahlung die Atmosphäre verlassen und die Strahlungsbilanz gerät in ein Ungleichgewicht. Diese Änderung der Strahlungsbilanz wird Strahlungsantrieb genannt. Das entstehende Ungleichgewicht wird durch eine Erhöhung der bodennahen Temperatur ausgeglichen. Steigt die bodennahe Temperatur an, so erhöht sich die Abstrahlung von langwelliger Strahlung und die Atmosphäre gelangt in ein neues Gleichgewicht, allerdings bei einer höheren bodennahen Temperatur. Diese Temperaturänderung kann die Niederschläge, den Meeresspiegel oder auch die Meereszirkulation beeinflussen, was wiederum die Häufigkeit von Dürren und Überschwemmungen erhöhen oder zu einer Verstärkung von Stürmen führen und dadurch Schäden verursachen kann.

Auch die Emissionen des Luftverkehrs ändern die Zusammensetzung der Atmosphäre und führen dadurch zu einer Störung ihrer Strahlungsbilanz. In Abbildung 3 ist diese Wirkung schematisch dargestellt. Die Emissionen des Luftverkehrs können das Klima auf verschiedene Weise beeinflussen. Es gibt direkte Treibhausgasemissionen, wie zum Beispiel CO₂ und Wasserdampf, aber auch indirekte Treibhausgasemissionen wie Stickoxide, die selbst nicht als Treibhausgas wirken, aber die Konzentration von Treibhausgasen (Ozon, Methan und stratosphärischer Wasserdampf) ändern. Des Weiteren beeinflusst die Emission von Partikeln die Strahlungsbilanz direkt durch verstärkte Reflexion oder Absorption der Strahlung, aber auch indirekt dadurch, dass Partikel die Bildung und Eigenschaften von Kondensstreifen und natürlichen Wolken beeinflussen können. Während CO₂, Kondensstreifen, Ozon und Wasserdampf zu einer Erwärmung der Atmosphäre führen, verursacht die Reduktion der Methankonzentration und der indirekte Aerosoleffekt eine

Abbildung 2

Strahlungsbilanz der Atmosphäre



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Kühlung der Atmosphäre. Kondensstreifen können sowohl wärmen als auch kühlen, führen aber über den Globus gemittelt zu einer Erwärmung. Insgesamt führen die Emissionen des Luftverkehrs zu einer Erwärmung der bodennahen Temperatur und tragen somit zum Klimawandel bei.

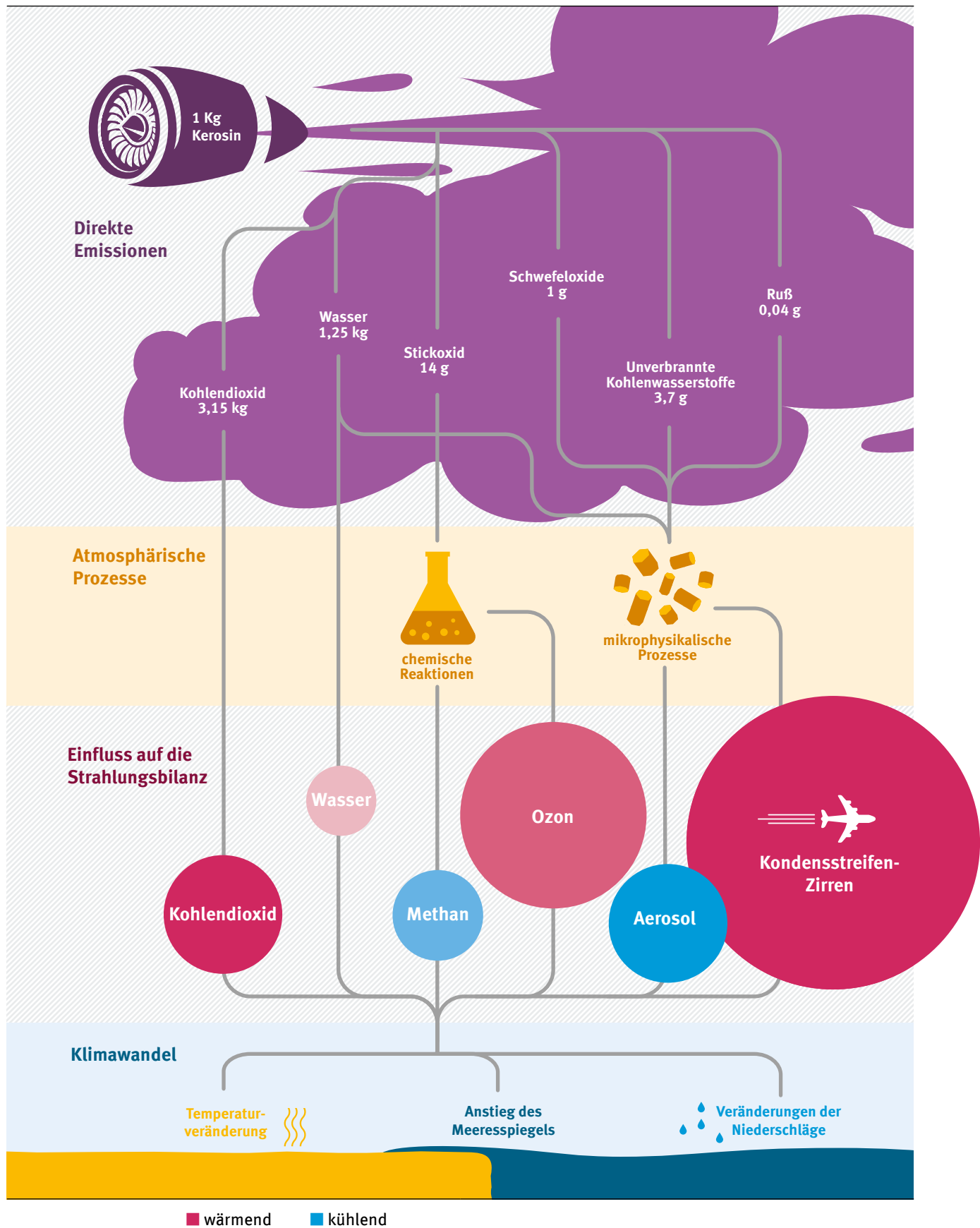
2.1 Emissionen

In Flugzeugtriebwerken werden die im Kerosin enthaltenen Kohlenwasserstoffe mit dem Sauerstoff der Luft zu CO₂ und H₂O verbrannt. So entstehen bei der Verbrennung von einem Kilogramm Kerosin etwa 3,15 kg CO₂ und 1,26 kg Wasserdampf.⁴ Als Folge einer nicht vollständigen Verbrennung sind auch geringe Mengen von Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenmonoxid (CO) im Abgas enthalten. Da bei modernen Flugtriebwerken ein Ausbrenngrad von mehr als 99,9 % erreicht wird, sind diese Substanzen aber im Reiseflug nur in Spuren im Abgas nachweisbar.

⁴ Da die Bestandteile des Kerosins mit dem Sauerstoff der Luft reagieren, ist die Menge an Emissionen pro kg Treibstoff größer als 1 kg.

Abbildung 3

Wirkung der Luftverkehrsemissionen auf das Klima



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Ein signifikanter Klimaeffekt ist für HC und CO nicht bekannt. Für zwei weitere Nebenprodukte der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen ist dies aber anders: Es handelt sich dabei um Stickoxide (NO_x : Summe von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) und nicht flüchtige Partikel (nvPM, nach engl.: non-volatile Particulate Matter). Im Folgenden werden diese beiden weniger bekannten Emissionen genauer erläutert.

Stickoxide (NOX)

Bei den Bedingungen, die in einer Triebwerksbrennkammer auftreten (hoher Druck und Temperatur), wird ein Teil des in der Luft enthaltenen Stickstoffs zu Stickoxiden (NO_x) oxidiert. Da diese Reaktion sehr viel Energie benötigt, begünstigt eine lange Verweilzeit der Verbrennungsluft in der Brennkammer die NO_x -Bildung. Gleichzeitig verbessern hohe Drücke und Temperaturen aber auch den Wirkungsgrad des Triebwerksprozesses und verringern damit den Kraftstoffverbrauch und die CO_2 -Emissionen des Flugzeugs.

Durch die Abhängigkeit der Stickoxidproduktion von Brennkammerdruck und -temperatur werden mit zunehmender Schubeinstellung mehr Stickoxide produziert. Der Anstieg ist dabei überproportional zum Kraftstoffverbrauch und steigt daher zum Maximalschub hin stark an. Dieser Maximalschub wird allerdings nur für den Start des Flugzeugs benötigt. Im Reiseflug wird das Triebwerk mit geringerem Schub betrieben, außerdem bewirkt der niedrigere Luftdruck in großer Höhe auch eine Verringerung der NO_x -Produktion.

Rußpartikel (nvPM)

Schließlich sind auch sehr kleine, nicht flüchtige Partikel im Abgas enthalten, die überwiegend aus Kohlenstoff (Ruß) bestehen. An der Rußbildung sind viele chemische und physikalische Prozesse beteiligt, die aktuell noch Gegenstand der Forschung sind. Nach aktuellem Stand des Wissens spielen im Kraftstoff enthaltene Kohlenwasserstoffe mit Kohlenstoffringen (sog. aromatische Kohlenwasserstoffe oder kurz Aromate) dabei eine wichtige Rolle.

Ein Großteil der zu Beginn der Verbrennung gebildeten Partikel wird im weiteren Verlauf gleich wieder oxidiert; die verbleibende Rußmenge am Austritt der Brennkammer ist daher um mehrere Größenordnungen kleiner als die ursprünglich gebildete. Dadurch zeigen verschiedene Triebwerkstypen teilweise sehr unterschiedliche Emissionsverläufe der Partikel, auch abhängig vom Triebwerksschub. Weiterhin wurde eine

Inwieweit erzeugen Triebwerke, die synthetisches Kerosin verbrennen, mehr oder weniger Wasserdampf als Triebwerke, die herkömmliches Kerosin verbrennen?

Die Menge des erzeugten Wasserdampfs ist abhängig von der Menge und dem Wasserstoffgehalt des eingesetzten Kraftstoffs. Kerosin aus fossilen Quellen enthält Verbindungen mit Kohlenstoffringen, die einen höheren Kohlenstoffanteil aufweisen. In synthetischem Kerosin sind diese in der Regel nicht enthalten, so dass dessen Wasserstoffanteil höher ist. Durch die Verbrennung von synthetischem Kerosin wird daher in der Regel mehr Wasserdampf, aber weniger Kohlendioxid erzeugt.

Weiterhin kann synthetisches Kerosin einen höheren Energiegehalt haben (angegeben durch den Heizwert des Gemisches). In diesem Fall würde für denselben Flug weniger Kraftstoff benötigt und daher (bei gleichem Wasserstoffanteil) weniger Wasserdampf erzeugt.

Der Beitrag des Wasserdampfs auf den effektiven Strahlungsantrieb (siehe Abschnitt 2.3) aller historischen Luftverkehrsemissionen beträgt allerdings nur etwa 2 % der gesamten Luftverkehrswirkung.

Abhängigkeit der nvPM-Emissionen vom Brennkammerdruck und vom Brennstoff/Luft-Verhältnis identifiziert. Im Reiseflugbetrieb tritt neben dem reduzierten Brennkammerdruck auch eine Erhöhung des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses infolge der geringeren Luftdichte in der Höhe auf. Diese beiden Effekte haben eine gegenläufige Wirkung, führen aber in der Summe zu weniger nvPM-Emissionen.

Da bisher noch nicht vollständig verstanden ist, wie sich die Partikel bilden, konnten noch keine Konzepte speziell zur Reduzierung der Partikelemissionen entwickelt werden. Bei Messungen hat sich aber gezeigt, dass die modernen Brennkammerkonzepte zur NO_x -Reduzierung auch die Partikelemissionen verringern. Insbesondere die Verbrennungskonzepte mit Luftüberschuss ermöglichen eine nahezu partikelfreie Verbrennung.

Weiterhin ist die Rußbildung bei Verwendung von Kraftstoffen mit geringem Gehalt an aromatischen Kohlenwasserstoffen stark reduziert, und zwar unabhängig vom Verbrennungskonzept. Synthetisch hergestellte klimaverträgliche Kraftstoffe (s. Kap. 4.2) enthalten gewöhnlich keine Aromate und könnten daher einen wichtigen Beitrag nicht nur zur Reduzierung der CO_2 - sondern auch der Partikelemissionen der Luftfahrt leisten. Ein signifikanter Einfluss auf die NO_x -Emissionen konnte bei der Verwendung von synthetischen Kraftstoffen dagegen nicht festgestellt werden.

Verteilung der Emissionen

Die geografische Verteilung der CO_2 -Emissionen des heutigen Luftverkehrs ist in Abbildung 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Luftverkehr überwiegend auf der Nordhalbkugel stattfindet. Besonders viel Luftverkehr findet zwischen Europa und den USA statt. Das Höhenprofil in Abbildung 4 zeigt, dass die Emissionen vor allem in der Reiseflughöhe von etwa 10 bis 12 km Höhe stattfinden. Dies entspricht in etwa den Flugflächen FL330-FL390. Flugflächen stellen im Luftverkehr eine wichtige Maßeinheit der Flughöhenmessung dar und repräsentieren Höhen gleichen Luftdrucks. Somit lassen sich Flugzeuge auch in großen Höhen sicher vertikal separieren.

2.2 Atmosphärische Änderungen

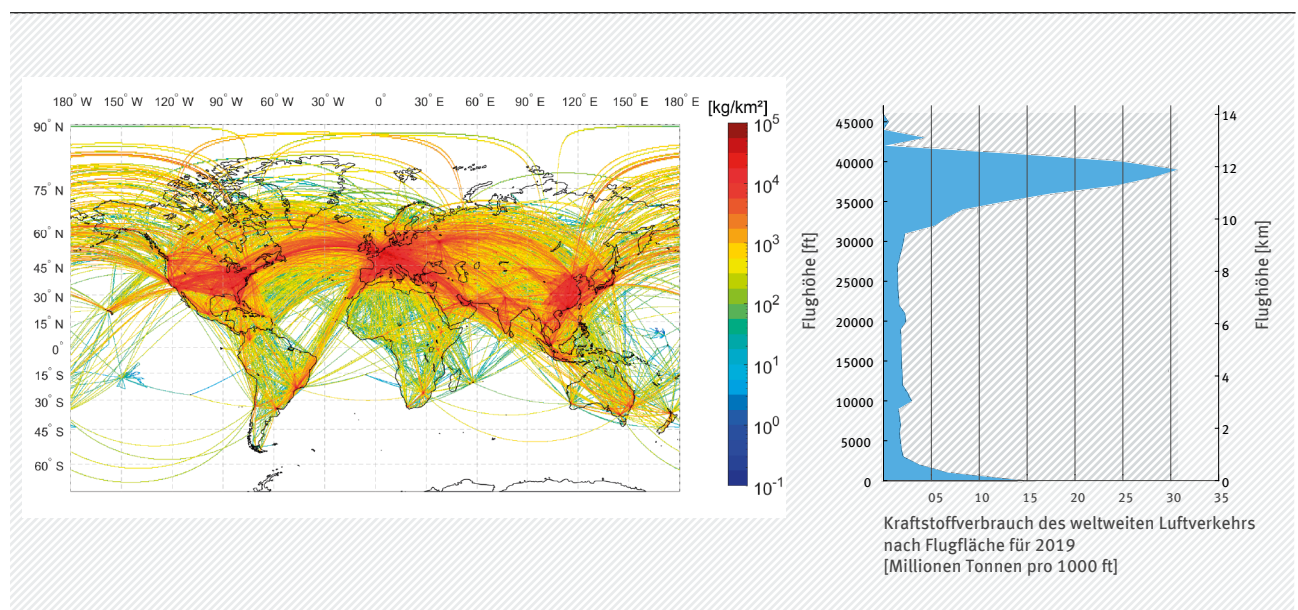
Kohlendioxid

Kohlendioxid ist das bekannteste und wichtigste Treibhausgas, das vom Menschen verursacht wird. Kohlendioxid absorbiert vor allem Strahlung, die von der Erdoberfläche abgestrahlt wird, während es die Strahlung, die von der Sonne kommt, kaum beeinflusst. Dadurch führt es zu einer Erwärmung der Atmosphäre.

Wesentlich für die Wirkung von CO_2 -Emissionen auf das Klima ist die lange Verweildauer des Gases in der Atmosphäre. Für CO_2 kann keine einheitliche Verweildauer angegeben werden. Ein Teil des CO_2 wird rasch von Pflanzen aufgenommen. Auch die Ozeane nehmen große Mengen des CO_2 auf, wodurch sie aus der Atmosphäre entfernt werden. Nach etwa 80 Jahren ist ungefähr die Hälfte des Kohlendioxideintrags abgebaut. Etwa 20 % der Emissionen sind aber auch nach 1000 Jahren noch in der Atmosphäre enthalten. Durch die lange Verweildauer wird CO_2 gleichmäßig in der Atmosphäre verteilt.

Abbildung 4

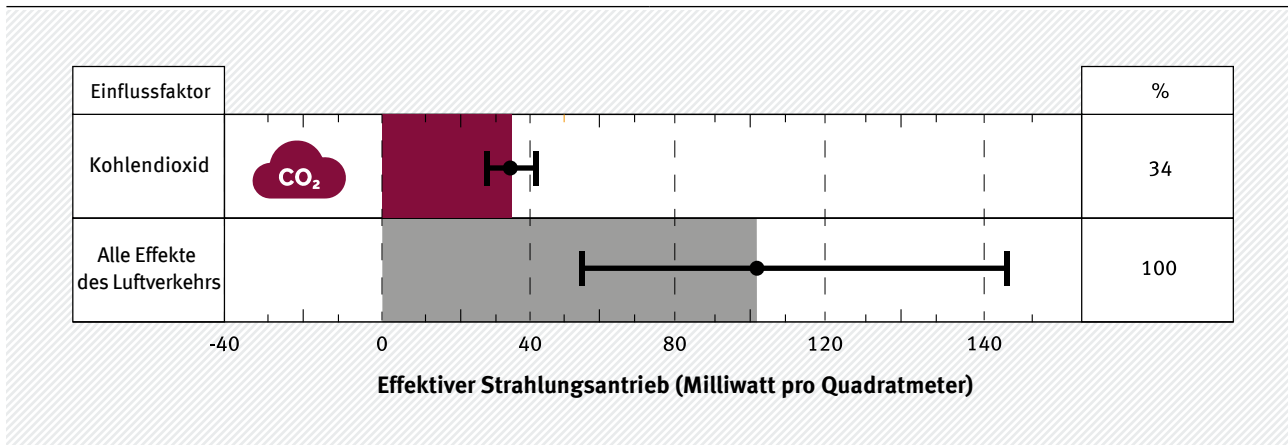
Globale Verteilung der Luftverkehrsemissionen 2019



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Abbildung 5

Anteil des CO₂ am gesamten effektiven Strahlungsantrieb des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018



—●— 95 % Konfidenzintervall

Quelle: Eigene Darstellung, DLR, basierend auf Daten von Lee et al., 2021

Da eine hohe Hintergrundkonzentration vorliegt, ist der relative Beitrag der Jahresemissionsmenge des Luftverkehrs zahlenmäßig gering, jedoch reichert sich das CO₂ aufgrund der langen Verweildauer in der Atmosphäre an, wodurch seine Wirkung stärker wird. In Abbildung 5 ist gezeigt, dass CO₂ etwa ein Drittel des gesamten effektiven Strahlungsantriebs im Jahr 2018 des bisherigen Luftverkehrs ausmacht.

Kondensstreifen

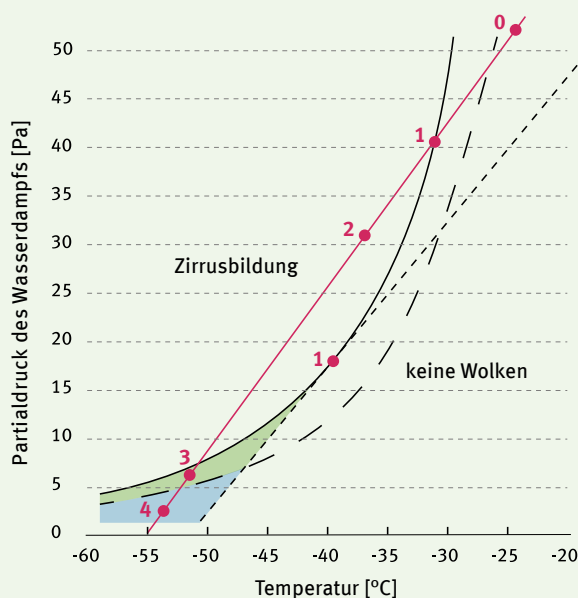
Eine deutlich sichtbare Wirkung des Luftverkehrs sind Kondensstreifen (Abbildung 6). Der von Flugzeugen ausgestoßene heiße Wasserdampf wird im Nachlauf des Flugzeugs mit der Umgebungsluft vermischt. Dabei kühlen die Abgase ab. Dieser Prozess setzt sich fort, bis die Temperatur und die Luftfeuchte der Umgebungsluft erreicht werden. Im Laufe dieses Vermischungsprozesses kann es vorkommen, dass die Luftfeuchte vorübergehend die Sättigungsgrenze übersteigt. Dann bilden sich spontan Wassertröpfchen (ähnlich wie beim Atmen in der kalten und feuchten Herbstluft). Ist es kalt genug, gefrieren die Tröpfchen im Laufe der weiteren Abkühlung und bilden einen Kondensstreifen. Ob der Kondensstreifen gleich wieder verschwindet oder aber über eine längere Zeit bestehen bleibt, hängt von den atmosphärischen Bedingungen ab (siehe Box rechts).

Hat CO₂, das in großen Höhen ausgestoßen wird, eine höhere Klimawirkung als am Boden?

Grundsätzlich hat die Erhöhung einer Konzentration von Treibhausgasen in größeren Höhen eine größere Wirkung, da die Temperaturdifferenz zwischen Emissionsschicht und Boden größer wird. Allerdings wirkt CO₂ über eine sehr lange Zeit, in der es sich unabhängig vom Emissionsort gleichmäßig in der Atmosphäre verteilt. Dadurch ist die langfristige Wirkung einer CO₂-Emission in größeren Höhen die gleiche wie die einer Emission am Boden.

Kondensstreifen

Je kälter die Luft ist, desto weniger Wasser in Form von Dampf kann sie aufnehmen. Ist diese Menge erreicht, so ist die Luft gesättigt. Überschreitet die Wasserdampfmenge diesen Sättigungswert (durchgezogene Kurve bzw. Punkt 1), kondensiert der überschüssige Wasserdampf zu flüssigem Wasser (Wolken oder Nebelbildung) beziehungsweise erstarrt zu kleinen Eiskristallen, die natürliche Zirruswolken oder künstliche Kondensstreifen (Punkt 2) bilden. Wird beim Abkühlvorgang des heißen Abgases (Punkt 0) mit der kalten Umgebungsluft (entlang der roten Geraden) die Eisübersättigung nur temporär überschritten, lösen sich Kondensstreifen nach kurzer Zeit wieder auf (Punkt 4). Liegt die Feuchte der Umgebungsluft allerdings über Eissättigung (Punkt 3), so können die Eiskristalle des Kondensstreifens weiter wachsen und über mehrere Stunden bestehen. Feuchten oberhalb der Wasser-sättigung kommen in der oberen Troposphäre natürlicherweise nicht vor.



- langlebige Kondensstreifen
- kurzlebige Kondensstreifen

Sättigungsdampfdruckkurve

- gegenüber Wasser
- - - gegenüber Eis

Abbildung 6

Kondensstreifen hinter einer A321



Quelle: Bild, DLR

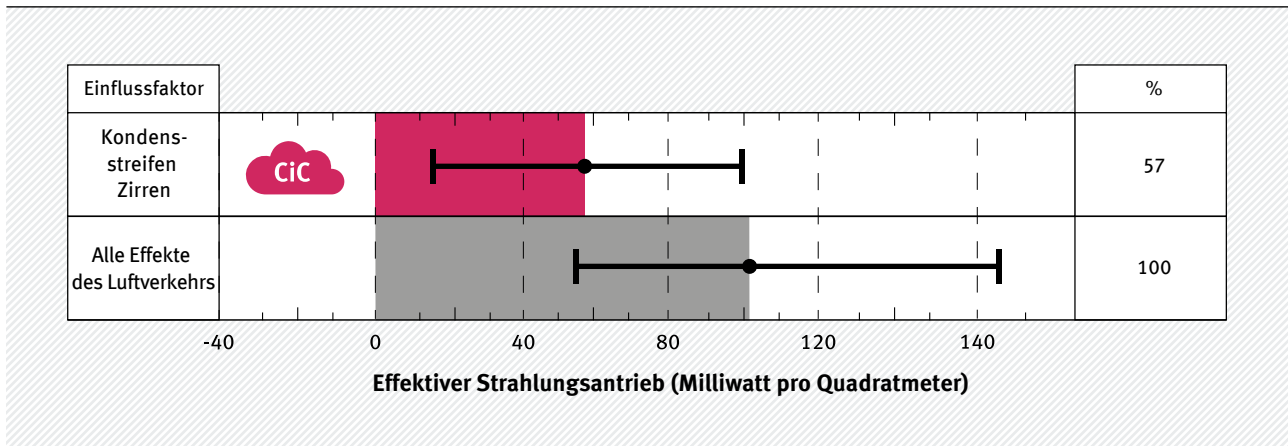
Wenn diese linienförmigen Wolken über längere Zeit bestehen, werden sie vom Wind weiter transportiert und verbreitert. Dabei können sie zu sogenannten Kondensstreifen-Zirren anwachsen, die durch die Verformung durch Wind kaum noch von natürlichen Eis- bzw. Schleierwolken (Zirren) zu unterscheiden sind.

Kondensstreifen können je nach Strahlungsbedingungen⁵ wärmend oder kühlend wirken, da sie sowohl Solarstrahlung in den Weltraum zurückstreuen und damit kühlen, als auch Strahlung, die von der Erdoberfläche abgestrahlt wird, in der Atmosphäre halten. Während Kondensstreifen-Zirren nachts immer wärmen, da keine Solarstrahlung vorhanden ist, die zurückgestreut werden kann, können sich tagsüber die wärmenden und kühlenden Effekte teilweise kompensieren. Über den Globus und Tag und Nacht gemittelt führen Kondensstreifen-Zirren zu einer Erwärmung.

⁵ Sonnenstand, Helligkeit des Untergrunds, andere Wolken.

Abbildung 7

Anteil der Kondensstreifen-Zirren am gesamten effektiven Strahlungsantrieb des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018



—●— 95 % Konfidenzintervall CiC = contrail-induced cloudiness

Quelle: Eigene Darstellung, DLR, basierend auf Daten von Lee et al., 2021

Kondensstreifen bilden sich global betrachtet im Schnitt nur auf etwa 10 % der Flugstrecken, haben aber dennoch bezogen auf den aktuellen Strahlungsantrieb aller historischen Luftverkehrsemissionen eine größere Wirkung als CO₂, (siehe Abbildung 7) da sie regional und temporär eine sehr starke Wirkung auf die Strahlung haben.

Stickoxide

Als unerwünschtes Nebenprodukt entstehen bei der Verbrennung von Kerosin durch die Oxidation von Luftstickstoff bei hohen Verbrennungstemperaturen Stickoxide (NO_x). Die chemisch reaktiven Stickoxide haben in der Atmosphäre nur eine sehr kurze Verweildauer und wirken nicht direkt auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre. Allerdings beeinflussen sie die Konzentration und Verweildauer von Treibhausgasen in der Atmosphäre.

Im Zusammenspiel mit einer Reihe weiterer Gase führen die NO_x-Emissionen des Luftverkehrs durch photochemische Reaktionen zu einer Ozonproduktion. Am Boden verschlechtert eine erhöhte Ozonkonzentration die Luftqualität (Smog). In Höhen, in denen der heutige Luftverkehr stattfindet (8 bis 13 km Höhe), wirkt Ozon hingegen vor allem als kurzlebiges Treibhausgas und die Erhöhung der Konzentration führt zu einer Erwärmung der Erdoberfläche.

Warum bilden sich nicht überall Kondensstreifen?

Kondensstreifen können sich nur in ausreichend kalter Luft bilden und sind nur in feuchter Luft langlebig. Ob sich ein Kondensstreifen bildet, hängt sehr stark davon ab, wo und wann der Wasserdampf der Flugzeuge ausgestoßen wird. Am häufigsten bilden sich Kondensstreifen in der Nähe der Tropopause (Höhe zwischen etwa 8 km an den Polen und etwa 17 km in den Tropen), da es dort sowohl kalt als auch feucht genug ist. In geringeren Höhen ist es meist zu warm, während es in größeren Höhen, d.h. in der Stratosphäre, in der Regel zu trocken ist. Zudem hängt sowohl die Bildung als auch die Verweildauer der Kondensstreifen-Zirren von der Wettersituation ab. Es gibt Wettersituationen, in denen sich keine Kondensstreifen bilden. Andererseits gibt es auch Wettersituationen, in denen es kaum natürliche Wolken gibt, der Himmel aber mit einer Vielzahl von Kondensstreifen-Zirren bedeckt ist.

Da für die Ozonproduktion Solarstrahlung notwendig ist, steigt mit zunehmender Solarstrahlung in großen Höhen auch die durch NO_x -Emissionen verursachte Ozonproduktion.

Die bei dieser Reaktion entstehenden OH-Radikale verursachen einen verstärkten Abbau von Methan in der Atmosphäre. Da Methan ein Treibhausgas ist, führt die Reduktion der Methankonzentration zu einer kühlenden Wirkung, welche etwa ein Jahrzehnt (Lebenszeit von Methan) andauert.

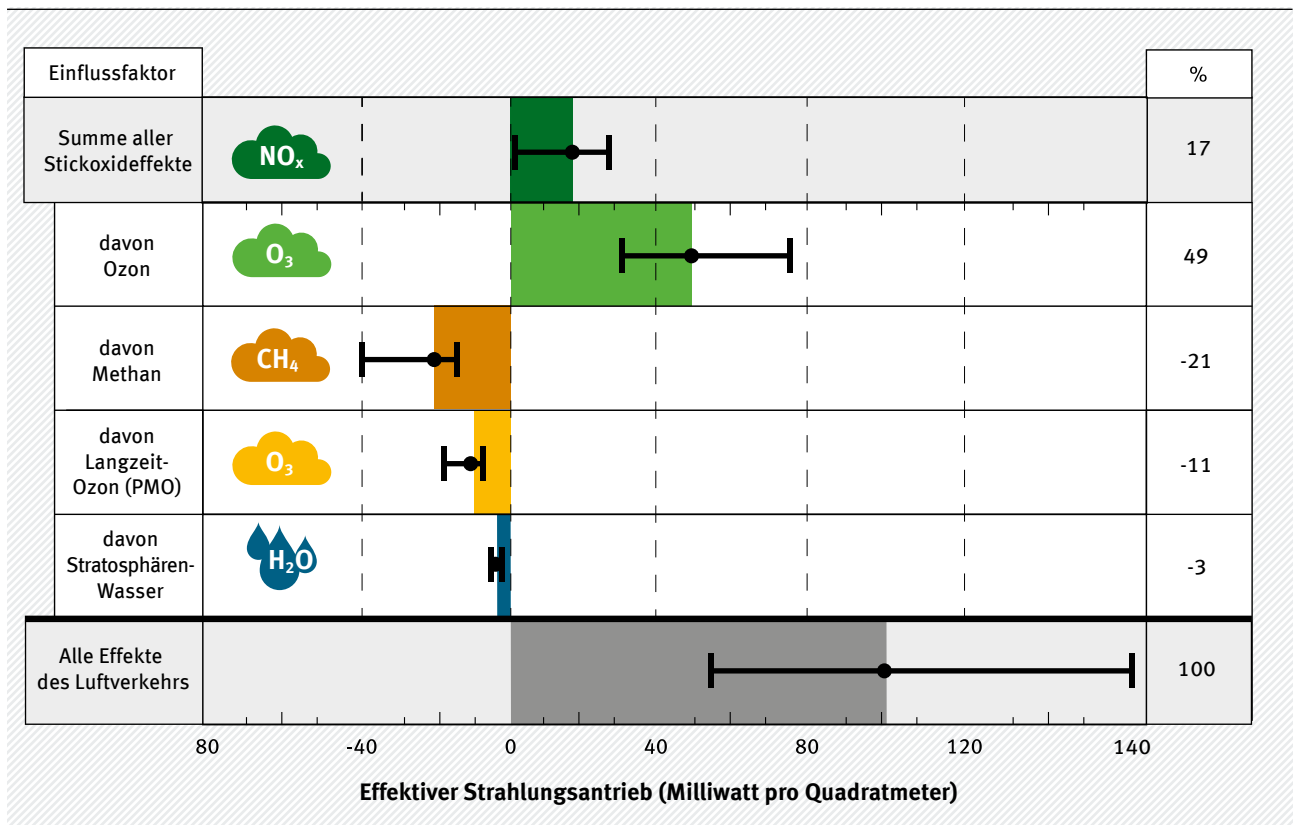
Infolge der reduzierten Methan-Konzentration nimmt auch die „natürliche“ Ozonproduktionsrate ab, wodurch sich im Laufe der Zeit eine geringere Ozonkonzentration einstellt. Die Dauer dieses Prozesses entspricht der Methanlebenszeit und führt zu einer Abkühlung. Der Effekt des langfristigen Abbaus der Ozonkonzentration ist allerdings deutlich geringer als die kurzzeitige Erhöhung der Ozonkonzentration kurz nach der Stickoxidemission.

Ein weiteres atmosphärisches Treibhausgas, das durch die Emission von Stickoxiden beeinflusst wird, ist der stratosphärische⁶ Wasserdampf. Ein Teil des Methans, das in die Stratosphäre transportiert wird, wird dort zu Kohlendioxid und Wasserdampf oxidiert. Gelangt nun durch die reduzierte Methankonzentration weniger Methan in die Stratosphäre, so kann sich dort weniger Wasserdampf bilden. Auch dieser Prozess läuft auf der Methan-Zeitskala ab und führt zu einem kühlenden Effekt, da Wasserdampf ebenfalls ein Treibhausgas ist.

Betrachtet man alle hier genannten Prozesse und deren Effekte, die auf die Stickoxid-Emissionen des Luftverkehrs zurückzuführen sind, so kompensieren sich Teile der Wirkungen. Insgesamt führt die Emission der Stickoxide bei einer globalen Betrachtung (auch auf längeren Zeitskalen) zu einer Erwärmung der Atmosphäre. Die Wirkung der Stickoxide auf den effektiven Strahlungsantrieb aller historischen Luftverkehrsemissionen beträgt etwa 17 % der gesamten Luftverkehrswirkung (siehe Abbildung 8).

Abbildung 8

Anteil der Stickoxide am gesamten effektiven Strahlungsantrieb des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018



—●— 95 % Konfidenzintervall

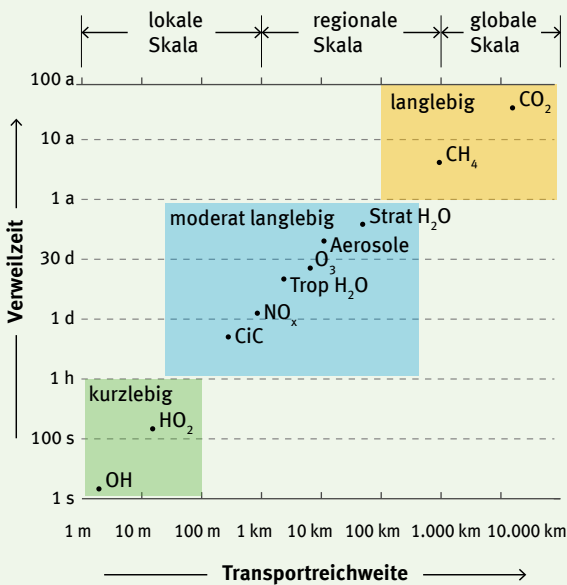
Quelle: Eigene Darstellung, DLR, basierend auf Daten von Lee et al., 2021

⁶ Die Stratosphäre befindet sich oberhalb der Troposphäre in einer Höhe von etwa 15 bis 50 km.

Atmosphärische Verweilzeit und Transportreichweite von Spurenstoffen

Je länger Spurenstoffe in der Atmosphäre verweilen, umso weiter werden sie um die Erde transportiert.

Besonders langlebig ist dabei Kohlendioxid. Da es ca. 80 Jahre dauert, bis die Hälfte des ausgestoßenen CO₂ wieder abgebaut ist, verteilt sich CO₂ über diese Zeit rund um den Globus. CO₂ beeinflusst das Klima somit auf globaler Skala. Besonders kurzlebige Spurenstoffe, wie NO₂, werden nur wenige Meter bis Kilometer weit transportiert. Ihre lokale Klimawirkung ist somit stark von örtlichen Umgebungsbedingungen, wie Wetterphänomenen, abhängig.



Aerosole

Aerosole sind heterogene Gemische aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen in der Luft. Dazu gehören zum Beispiel Ruß, Mineralstaub oder Sulfatpartikel. Der Luftverkehr stößt sowohl Aerosole (z.B. Rußpartikel) als auch Aerosolvorläufer (z.B. Stickstoff und Schwefelverbindungen) aus, aus denen sich später Aerosole bilden können. Aerosole wirken in der Atmosphäre auf zwei sehr unterschiedliche Weisen: Einerseits direkt durch Absorption und Reflektion von Strahlung und andererseits indirekt durch Beeinflussung der Wolkenbildung.

Die Wirkung des direkten Aerosoleffekts ist stark von den optischen Eigenschaften der jeweiligen Partikel abhängig. Für Sulfatpartikel überwiegt die Reflexion kurzweiliger Solarstrahlung, während die Absorption langweiliger terrestrischer Strahlung eher gering ist. Dadurch führt Sulfat zu einer Abkühlung der Atmosphäre. Rußpartikel hingegen absorbieren einen Großteil der einfallenden Solarstrahlung und führen so zu einer Erwärmung der Atmosphäre.

Neben dem direkten Aerosoleffekt können Aerosole das Klima auch indirekt beeinflussen. Einige Aerosol-spezies, z.B. Sulfat- und Rußpartikel, können die Bildung und die Eigenschaften von Wolken stark beeinflussen. Die von Flugzeugen ausgestoßenen Aerosole sowie Aerosolvorläufer, die in chemischen Prozessen zu sulfat- und nitrathaltigen Aerosolen umgewandelt werden, können in der Atmosphäre als Wolkenkondensationskerne wirken. Eine größere Anzahl an Wolkenkondensationskernen führt zum Beispiel zu einer größeren Anzahl von Wolkentropfen, die dafür aber kleiner sind. Diese führen bei gleichem Flüssigwasser-gehalt in der Atmosphäre zu einer Erhöhung der Wolkenalbedo (mehr Licht wird zurückgestrahlt) wodurch mehr Solarstrahlung ins Weltall zurückgestreut wird, und zu einer längeren Verweildauer der Wolken, da kleinere Tropfen langsamer ausregnen. Dies hat sowohl Einfluss auf die Kondensstreifen-Zirren als auch auf natürliche Wolken.

Zudem können Kondensationskerne aus dem Flugverkehr, 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 erste Abschätzungen der Wirkung auf niedrige („warme“) Wasserwolken und Eiswolken.⁷ Danach führen diese Wolken zu einer Abkühlung. Wegen der ungenauen Kenntnis der Prozesse, die die Aerosole durchlaufen, sind die Abschätzungen des dazu gehörenden Strahlungsantriebs sehr unsicher. Deshalb wird derzeit die Höhe der indirekten Aerosoleffekte des Luftverkehrs bei der Gesamtbewertung seiner Klimawirkung häufig nicht genannt.

Wasserdampf

Wasserdampf ist eines der wichtigsten natürlichen Treibhausgase und für etwa zwei Drittel des natürlichen Treibhauseffektes verantwortlich. Der aufgrund des Luftverkehrs zusätzlich verursachte Wasserdampf führt zu einer weiteren Erwärmung der Atmosphäre. In geringen Höhen ist die Verweildauer des Wasserdampfs sehr gering, da der Wasserdampf in Wolken kondensiert und ausregnet. Beim Luftverkehr wird ein großer Anteil des Wasserdampfs jedoch in der Reiseflughöhe, d.h. zwischen 8 und 13 km Höhe, ausgestoßen. Dort ist die Luft um ein Vielfaches trockener als am Boden, und die atmosphärische Verweildauer des Wasserdampfs deutlich länger. Daher liefert hier der Luftverkehr einen merklichen Beitrag zur Gesamtkonzentration des Wasserdampfs. Dieser Effekt verstärkt sich bei noch höheren Flügen, wie z.B. Überschallflügen. Dennoch ist die Verweildauer selbst für Emissionen in diesen Regionen mit einigen Tagen bis einigen Wochen zu gering, um eine homogene Verteilung des zusätzlichen Wasserdampfs zu erlauben.

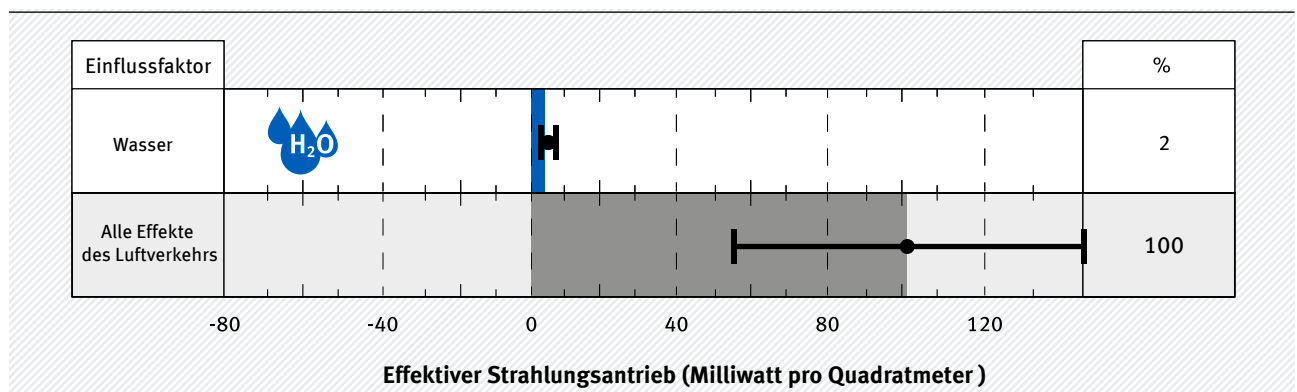
Die Wirkung des direkten Wasserdampfeffekts hängt daher ebenfalls von der Wetterlage ab, insbesondere von der Höhe der Tropopause⁸ und von der vorherrschenden Transportrichtung der Luftmassen. Liegt die Tropopause in geringerer Höhe, wird der Wasserdampf verstärkt in der Stratosphäre ausgestoßen, wo die Verweildauer deutlich höher ist und die Wirkung damit stärker. Der aktuelle Beitrag des Wasserdampfs auf den effektiven Strahlungsantrieb aller historischen Luftverkehrsemissionen beträgt nur etwa 2 % der gesamten Luftverkehrswirkung (siehe Abbildung 9).

Welche Klimawirkung geht von Wasserdampfemissionen in der Atmosphäre aus?

Wasserdampf kann auf verschiedene Weise das Klima beeinflussen. Zunächst ist Wasserdampf ein Treibhausgas und erwärmt damit die Atmosphäre. Zudem kann die Emission von Wasserdampf zur Bildung von Kondensstreifen führen. Je mehr Wasser im Abgasstrahl der Turbine enthalten ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für die Kondensstreifenbildung. Für das weitere Wachsen des Kondensstreifens spielt die erhöhte Wasserdampfkonzentration allerdings nur eine untergeordnete Rolle, da das Wasser, das zusätzlich kondensiert, überwiegend aus der Atmosphäre stammt.

Abbildung 9

Anteil des Wasserdampfs am gesamten effektiven Strahlungsantriebs des bisherigen Luftverkehrs im Jahr 2018



—●— 95 % Konfidenzintervall

Quelle: Eigene Darstellung, DLR, basierend auf Daten von Lee et al., 2021

⁷ z.B. Righi et al., 2013, Righi et al., 2021.

⁸ Die Tropopause ist die Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre. Sie liegt in den Tropen bei etwa 17 km und an den Polen bei etwa 8 km Höhe.

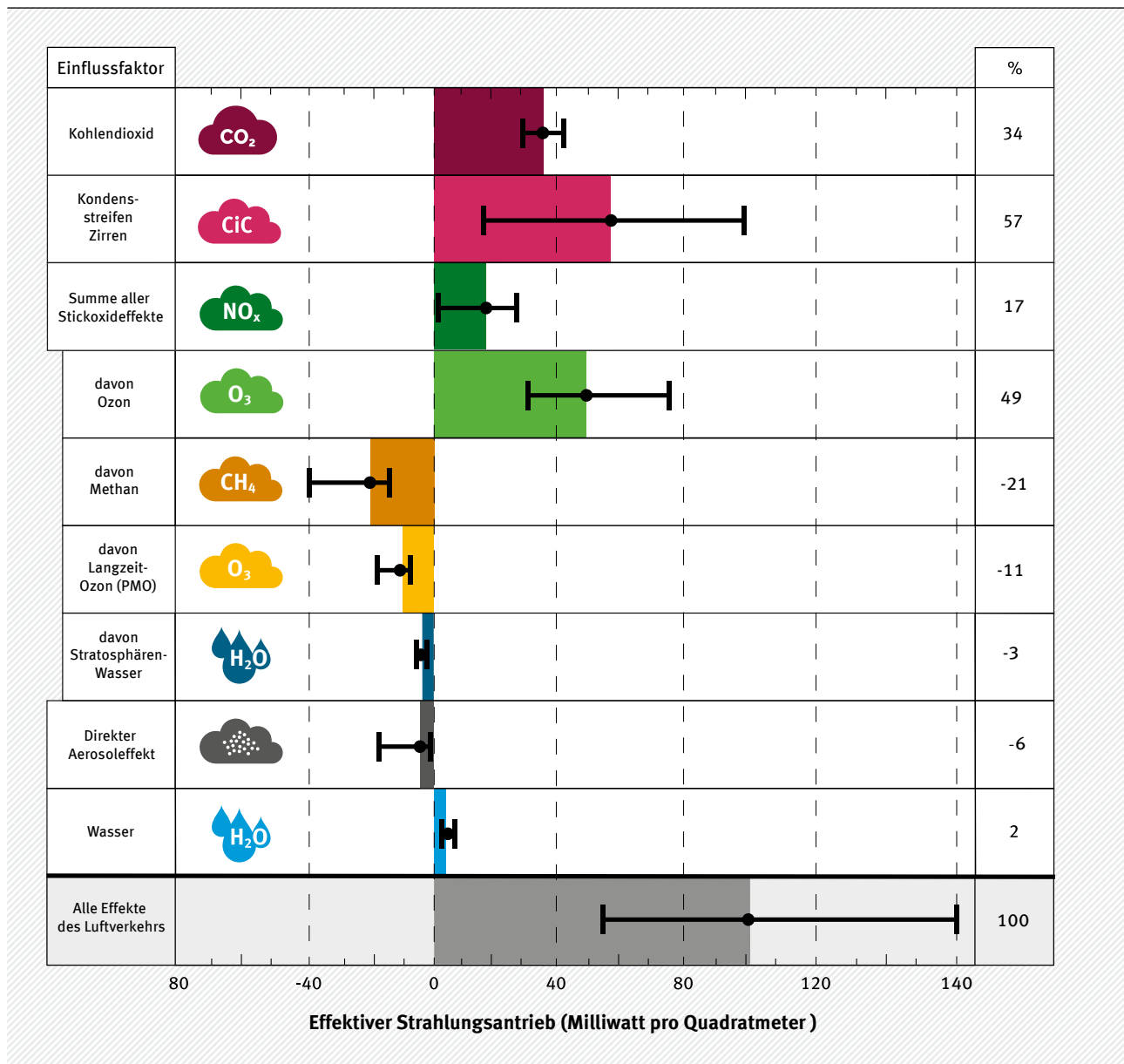
2.3 Resultierende Klimawirkung

Wie sich die globalen bisherigen Emissionen des Luftverkehrs auf die heutige Strahlungsbilanz auswirken, ist in Abbildung 10 zu sehen. Positive Strahlungsantriebe führen zur Erwärmung, negative zur Abkühlung. Es zeigt sich, dass neben CO₂ vor allem die Kondensstreifen-Zirren und Stickoxide auf das Klima einwirken. Die direkten Effekte von Wasserdampf

und die direkten Aerosoleffekte spielen nur eine untergeordnete Rolle. Ein potentiell starker negativer Strahlungsantrieb wird durch die indirekten Aerosol-effekte verursacht, wobei hier noch sehr große Unsicherheiten existieren, da die kleinskaligen Prozesse im Abgasstrahl im Klimamodell nicht aufgelöst werden können.

Abbildung 10

Effektiver Strahlungsantrieb des bisherigen globalen Luftverkehrs im Jahr 2018



Quelle: Eigene Darstellung, DLR, basierend auf Daten von Lee et al., 2021

Die Änderung in der Strahlungsbilanz führt zu einer Änderung in der bodennahen Temperatur. Allerdings führen gleiche Strahlungsantriebe verschiedener Spezies nicht zwangsläufig zu gleichen Temperaturänderungen. Die Ursache dafür sind unterschiedliche Klimasensitivitäten, die sich aus der unterschiedlichen räumlichen Verteilung und unterschiedlichen Rückkopplungen ergeben. Diese Rückkopplungen können zu einer Verstärkung, aber auch zu einer Verringerung der Wirkung führen. Ozon zeigt z.B. eine höhere Klimasensitivität als CO₂, während Kondensstreifen-Zirren eine deutlich geringere Klimasensitivität zeigen. Dies wird beim effektiven Strahlungsantrieb bereits berücksichtigt.

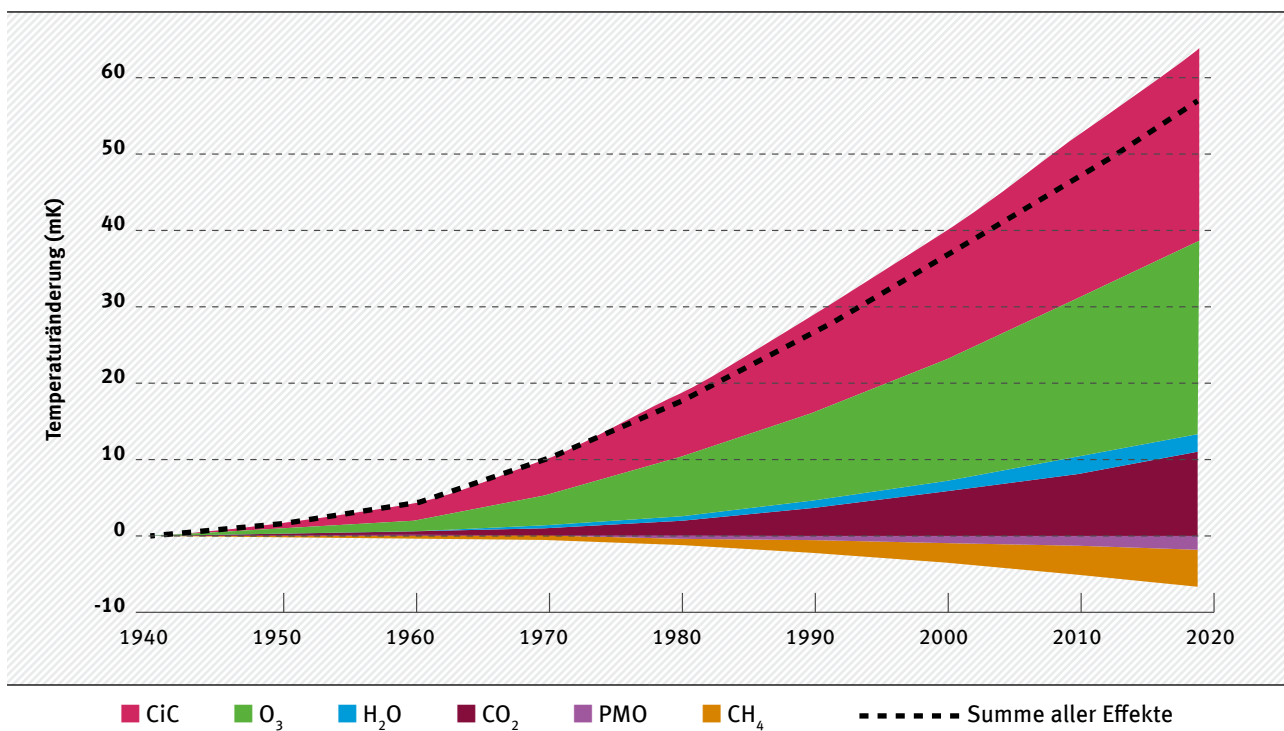
Abbildung 11 zeigt, wie sich die historischen Emissionen des Luftverkehrs auf die Temperaturänderung bis zum Jahr 2019 auswirken (ohne Berücksichtigung der Aerosoleffekte). Bis 2019 verursachte der Luftverkehr eine Änderung in der bodennahen Temperatur von etwa 57 mK⁹ (mK = Millikelvin). Geht man davon aus, dass die vom Menschen verursachte Temperaturänderung bei etwa 1,1 K¹⁰ liegt, ist der Luftverkehr aktuell für etwa 5 % des anthropogenen Klimawandels verantwortlich.

Warum spielen Nicht-CO₂-Klimaeffekte besonders im Luftverkehr eine große Rolle?

Viele der Nicht-CO₂-Effekte hängen vom Emissionsort ab. Kondensstreifen können sich zum Beispiel nur in Regionen bilden, in denen es feucht und kalt ist. Dies ist besonders in den Flughöhen heutiger Flugzeuge der Fall. Aber auch für Klimawirkungen durch die Erhöhung der Ozon- und Wasserdampfkonzentration sind die Regionen heutiger Fluglevel besonders ungünstig. Außerdem spielt die Temperaturdifferenz zwischen Boden und der Schicht in der sich die Wolken oder Treibhausgase befinden eine wichtige Rolle. Da die Atmosphäre in großen Höhen kälter ist, strahlt sie mit einer geringeren Temperatur aus als der Boden. Die Abstrahlung wird also reduziert. In Bodennähe ist der Temperaturunterschied gering und damit auch der Unterschied in der Abstrahlung. Aus diesen Gründen spielen die Nicht-CO₂-Effekte im Luftverkehr eine deutlich größere Rolle als im Straßenverkehr.

Abbildung 11

Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderung der einzelnen Spurenstoffe des bisherigen Luftverkehrs bis zum Jahr 2019



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

9 Temperaturdifferenz von 1K entspricht 1 °C Temperaturänderung.
 10 IPCC, 2023.

Vergleich der Klimawirkung



3



Vergleich der Klimawirkung

Für manche Sektoren oder Prozesse wird häufig nur die Klimawirkung von CO₂ angegeben. Gerade beim Luftverkehr sind aber auch die Nicht-CO₂-Effekte besonders relevant. Daher ist es wichtig, die Klimawirkung aller Klimaspezies¹¹ (CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte) zu aggregieren, um zu wissen, wie sich welche Maßnahmen auf das Klima auswirken.

Die Klimawirkung des Luftverkehrs setzt sich aus der Wirkung einer Reihe von Klimaspezies zusammen. Diese wirken in unterschiedlicher Weise auf die Strahlungsbilanz. Zusätzlich haben sie unterschiedliche Verweildauern, wodurch sie nicht direkt in ihrer Wirkung verglichen werden können. Zur Bewertung der Klimawirkung verschiedener Luftverkehrsszenarien oder verschiedener Spurenstoffemissionen ist es deshalb notwendig, ein Maß oder auch Metrik genannt, für den Vergleich zur Verfügung zu haben. Dabei stellt eine Metrik den direkten Zusammenhang zwischen der Emission und der zu betrachtenden Wirkung (z.B. Strahlungsantrieb, Temperaturänderung oder Schaden) dar.

Der Vergleich der Klimawirkung verschiedener Emissionen ist ähnlich dem Vergleich von Äpfeln und Birnen. Eine allgemeine Metrik, mit der beide in allen ihren Eigenschaften verglichen werden können, gibt es nicht. Stellt man aber eine bestimmte Frage, zum Beispiel, zum Preis eines Kilogramms oder zum Vitamingehalt, kann man Äpfel und Birnen sehr einfach miteinander vergleichen. Das Problem bei einer Metrik zum Vergleich der Klimawirkung ist, dass der Begriff „Klimawirkung“ nicht genauer definiert ist. Dabei ist weder festgelegt, welche Wirkung untersucht wird (z. B. Strahlungsantrieb, Temperaturänderung), noch für welchen Zeitpunkt oder Zeitraum die Wirkung betrachtet werden soll. Für eine bestimmte Frage, z. B.: „Wie ist die Temperaturänderung im Jahr 2100?“, kann aber eine eindeutige Metrik angegeben werden.

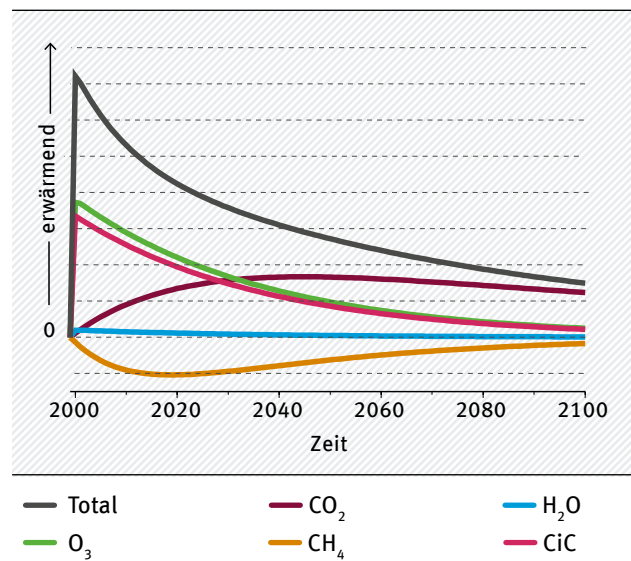
Häufig vergleicht man unterschiedliche Klimawirkungen anhand ihres jeweiligen Strahlungsantriebes.

Durch die Multiplikation des Strahlungsantriebs mit der Klimasensitivität (λ) lässt sich die global gemittelte bodennahe Temperaturänderung (dT) bestimmen. Allerdings unterscheiden sich die Klimasensitivitäten der unterschiedlichen Klimaspezies. Für Kondensstreifen-Zirren ist sie zum Beispiel deutlich geringer als für Ozon (siehe Abschnitt 2.3).

Wie groß die Wirkung der Nicht-CO₂-Effekte im Vergleich zur Wirkung von CO₂ ist, hängt zudem davon ab, wann man die Temperaturänderung betrachtet. Als Beispiel ist in Abbildung 12 die Temperaturänderung aufgrund einer Emission im Jahr 2000 gezeigt. CO₂ (dunkelrote Linie) hat in den ersten Jahren nur einen sehr geringen Einfluss auf die Temperatur. Da es sich durch die lange Verweildauer in der Atmosphäre anreichert, nimmt die Wirkung mit der Zeit zu. Auch die Wirkung von Stickoxiden auf Methan (hellbraune Linie) zeigt zu Beginn nur eine geringe Wirkung, verstärkt sich aber in den nächsten zehn Jahren und nimmt dann wieder ab. Die Temperaturverläufe von Kondensstreifen-Zirren (CiC, rote Linie), die von Stickoxiden verursachte Ozonänderung (hellgrüne Linie) und H₂O (blaue Linie) sind sehr ähnlich. Die Wirkung ist zu Beginn sehr stark, nimmt dann aber im Laufe der Zeit ab.

Abbildung 12

Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderung der verschiedenen Klimaspezies für eine Emission im Jahr 2000



Quelle: Daten aus Dahlmann et al., 2016

11 Unter Klimaspezies versteht man die unterschiedlichen Komponenten der Klimawirkung, also z.B. Kohlendioxid, Ozon, Methan, Kondensstreifen und Wasserdampf.

In den ersten etwa 30 Jahren dominieren Kondensstreifen-Zirren und Ozon die Temperaturänderung, also die Nicht-CO₂-Effekte, während anschließend die CO₂-Effekte überwiegen. Das Verhältnis von Nicht-CO₂- zu CO₂-Effekten sinkt, bei der hier dargestellten Emission in nur einem Jahr, von über 20:1 in den ersten Jahren auf etwa 1:4 nach 100 Jahren.

Eine Möglichkeit, diese Abhängigkeit vom Zeitraum zu verringern, ist die Mittelung oder Integration über diesen Zeitraum, wie es zum Beispiel bei den Metriken ATR¹² und GWP¹³ gemacht wird. Aber auch hier beeinflusst der Zeitraum, über den gemittelt wird, das Verhältnis zwischen Nicht-CO₂-Effekten und CO₂. Ein kurzer Zeitraum legt den Fokus auf Nicht-CO₂-Effekte, während ein langer Zeitraum den Fokus auf CO₂ legt. Betrachtet man die Wirkung aller historischen Luftverkehrsemissionen im Verhältnis zur aktuellen Änderung des effektiven Strahlungsantriebes, verursachen die Nicht-CO₂-Effekte (ohne die Berücksichtigung der Aerosoleffekte) etwa zwei Drittel der Wirkung.

Für die Verringerung der Folgen des Klimawandels spielen sowohl die kurzen als auch die langen Zeiträume eine Rolle. Es muss einerseits gewährleistet werden, dass die Temperatur in den nächsten Jahrzehnten nicht zu stark ansteigt, um keine Kippmechanismen im Klimasystem der Erde auszulösen, die nicht umkehrbar sind. Auf der anderen Seite muss sichergestellt werden, dass man den Klimawandel und damit verbundene Probleme nicht einfach auf die nächsten Generationen überträgt, indem man jetzt die kurzfristigen Effekte reduziert, dadurch aber die langfristigen klimaschädlichen Effekte in Kauf nimmt. Ein Mittelweg ist daher die Verwendung einer integrierenden oder mittelnden Metrik mit einem langen Zeitraum, da dann sowohl die kurzfristigen als auch die langfristigen Effekte berücksichtigt werden.

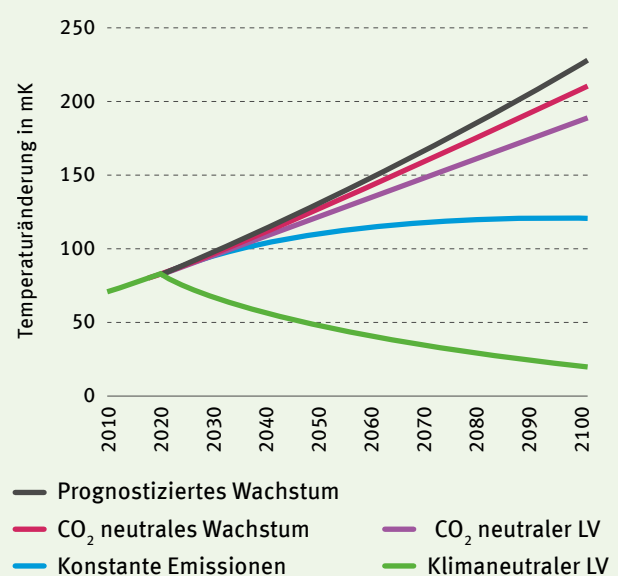
Eine Metrik, die sowohl kurzfristige als auch langfristige Temperaturänderungen berücksichtigt, wäre zum Beispiel das ATR₁₀₀.

12 Average Temperature Response, gemittelte bodennahe Temperaturänderung über einen Zeitraum.
 13 Global Warming Potential, über einen Zeitraum summierter Strahlungsantrieb einer Spezies relativ zu dem von CO₂.
 14 Unter der vereinfachten Annahme, dass sich die räumliche Verteilung der Emissionen nicht ändert.
 15 In der Literatur werden die Begriffe CO₂-neutraler oder klimaneutraler Luftverkehr unterschiedlich und zum Teil als Synonym verwendet.

Wie entwickelt sich die Temperatur in Zukunft für unterschiedliche Emissionsszenarien?

Die vom Luftverkehr verursachte Temperaturänderung wird maßgeblich von der ausgestoßenen Menge sowie der räumlichen und zeitlichen Verteilung aller klimarelevanten Emissionen bestimmt. Emissionsort und -menge hängen dabei vom globalen Verkehrsaufkommen, der Kraftstoffwahl und der Effizienz der eingesetzten Flugzeugtypen ab.

Übersteigt, wie in den letzten Jahrzehnten, das Luftverkehrswachstum die Verringerung des spezifischen fossilen Kraftstoffverbrauchs, so nehmen die Emissionen und somit die vom Luftverkehr verursachte Temperaturänderung weiter zu (schwarze Kurve)¹⁴. Bleibt die Menge an emittiertem CO₂ gleich, so spricht man von **CO₂-neutralem Wachstum** (rote Kurve). Bei einem **CO₂-neutralen Luftverkehr**¹⁵ geht man davon aus, dass die CO₂-Nettoemissionen nicht nur konstant bleiben, sondern auf Null sinken (lila Kurve). Beides könnte durch Effizienzsteigerungen, alternative Kraftstoffe oder auch Kompensationen erreicht werden. Aufgrund steigender Nicht-CO₂-Effekte und der Anreicherung der CO₂-Effekte, steigt jedoch auch in diesen Szenarien die Temperatur an. Bleiben in Zukunft neben CO₂-Emissionen auch die Emissionsmenge aller Spurenstoffe gleich, spricht man von **konstanten Luftverkehrsemissionen** (blaue Kurve). Infolge der Trägheit der Atmosphäre und der Anreicherung von CO₂ führt dies nur zu einer Verlangsamung der Erwärmung. Für einen **klimaneutralen Luftverkehr** müssten alle Emissionen vermieden oder kompensiert werden (grüne Kurve).



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs



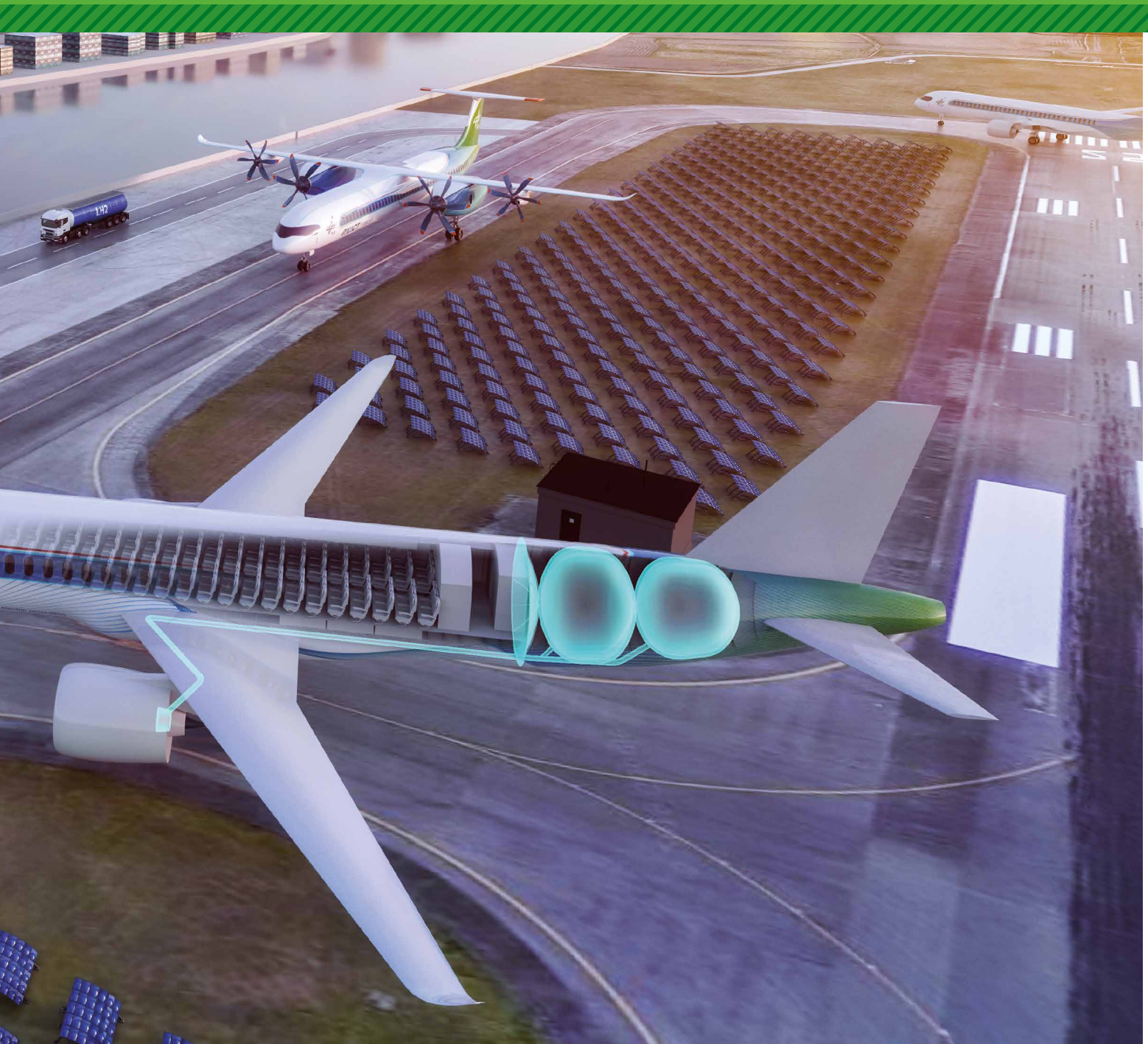
4

Energieeffizientes Flugzeug

Emissionsarme Antriebe

Alternative Kraftstoffe

Emissionsreduziertes Lufttransportsystem



Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs

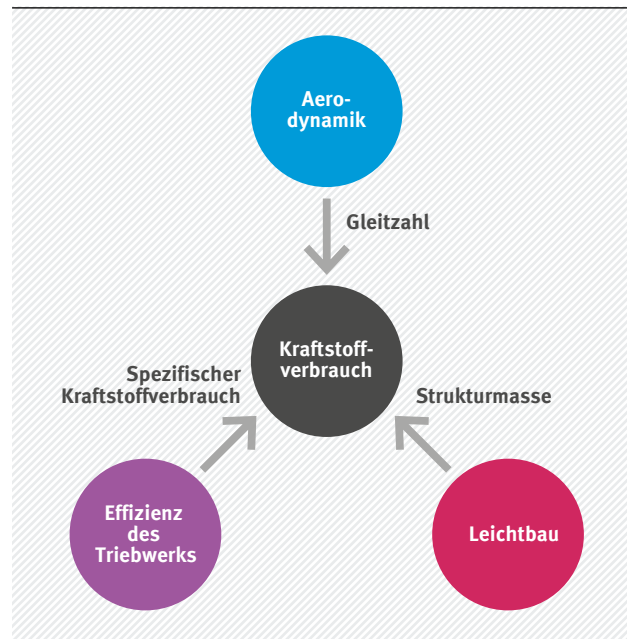
Infolge der stark unterschiedlichen Wirkungsweise von CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten müssen Maßnahmen erforscht und umgesetzt werden, die die Gesamtklimawirkung aller Effekte reduzieren.

Unter der vereinfachten Annahme, dass sich die räumliche und zeitliche Verteilung der Emissionen nicht ändert, gilt: Je weniger Emissionen pro Flug ausgestoßen werden, umso geringer ist auch die resultierende Klimawirkung. Betrachtet man allerdings einzelne Flugrouten an unterschiedlichen Tagen, können individuelle Maßnahmen auch widersprüchlich zueinander sein: Sollen beispielsweise Regionen umflogen werden, in denen stark erwärmende Kondensstreifen-Zirren entstehen würden, ist dies oft nur bei einem erhöhten Kraftstoffverbrauch und steigenden Emissionen möglich. In diesen Fällen muss also die verringerte Klimawirkung der Kondensstreifenvermeidung gegenüber der erwärmenden Wirkung zusätzlicher CO₂-Emissionen bilanziert werden, um die resultierende Klimawirkung bestimmen zu können. Bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen gilt es deshalb, die Klimawirkung aller klimarelevanten Luftverkehrsemissionen sowie ihre indirekten atmosphärenchemischen und mikrophysikalischen Effekte zusammen zu betrachten und ganzheitlich zu optimieren. Besonders vielversprechende Maßnahmen werden auf den nachfolgenden Seiten vorgestellt. Diese umfassen neben alternativen Kraftstoffen auf technologischer Seite die emissionsarmen Antriebe und das energieeffiziente Flugzeug sowie auf operationeller bzw. regulatorischer Seite das emissionsreduzierte Lufttransportsystem. Flankiert werden diese Themengebiete von der Digitalisierung, die als maßgeblicher Treiber für eine beschleunigte Umsetzung der Maßnahmen gesehen wird.

Wie in Zukunft eine emissionsfreie Luftfahrt erreicht werden kann, hat u.a. das DLR in seiner Luftfahrtstrategie zum European Green Deal veröffentlicht.¹⁶

Abbildung 13

Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs



Quelle: eigene Darstellung, DLR

4.1 Energieeffizientes Flugzeug

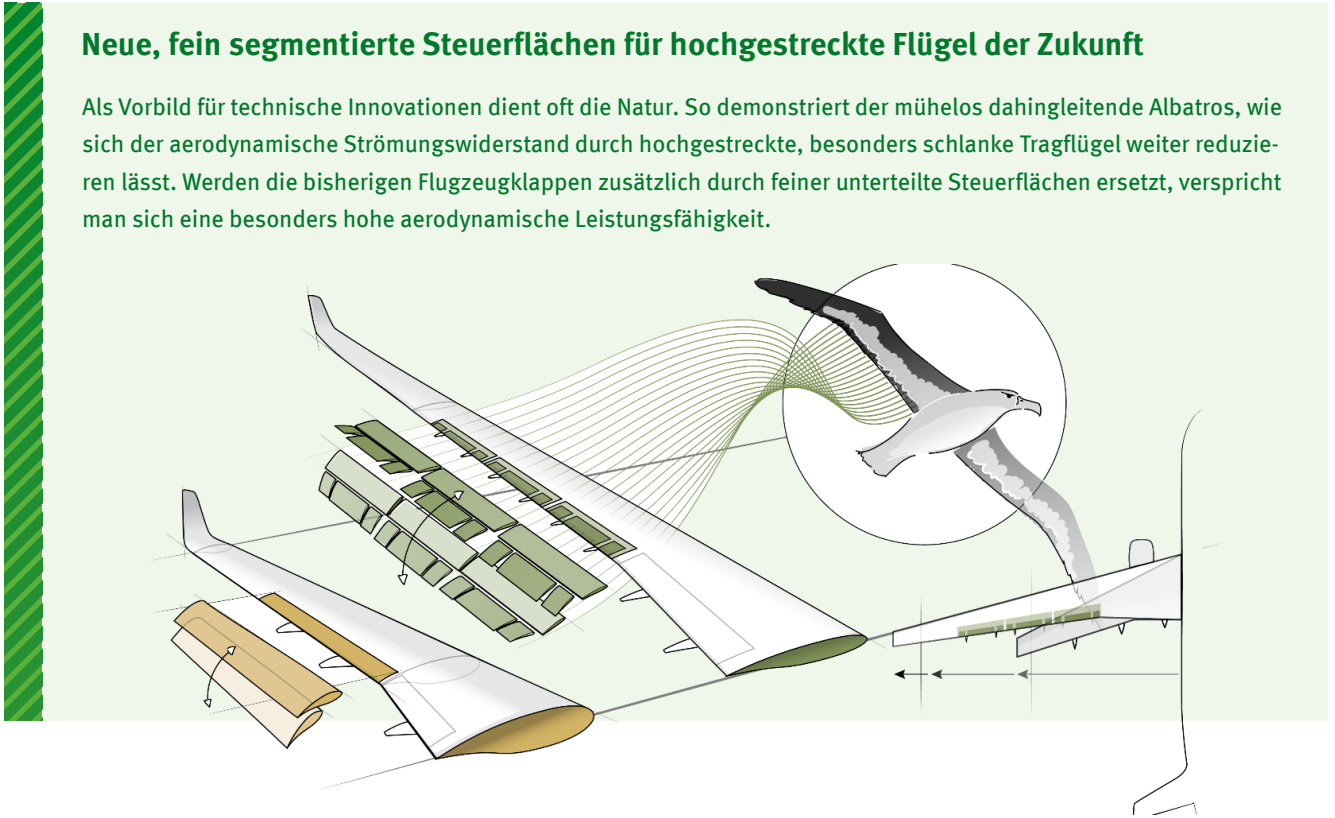
Technologieseitig kann die Emissionsmenge pro Flug – vor allem CO₂ – durch stetige Verbesserungen der Aerodynamik, der Flugzeugstruktur und des Triebwerkes reduziert werden (siehe Abbildung 13). Der Übergang zu neuartigen Energieträgern wie SAF (engl.: sustainable aviation fuel, nachhaltig hergestelltes Kerosin), Wasserstoff oder Batterien hat signifikante Auswirkungen auf die Konfiguration eines Flugzeugs, dessen Reichweite und Transportleistung sowie die Möglichkeiten, neue Technologien einzusetzen.

Zur Reduzierung der Klimawirkung von Flugzeugen wird in erster Linie eine Verringerung der CO₂-Emissionen durch aerodynamische Verbesserungen und leichtere Flugzeugstrukturen, sowie verbesserte Triebwerke (siehe nächster Abschnitt) angestrebt.

¹⁶ DLR, 2021.

Neue, fein segmentierte Steuerflächen für hochgestreckte Flügel der Zukunft

Als Vorbild für technische Innovationen dient oft die Natur. So demonstriert der mühelos dahingleitende Albatros, wie sich der aerodynamische Strömungswiderstand durch hochgestreckte, besonders schlanke Tragflügel weiter reduzieren lässt. Werden die bisherigen Flugzeugklappen zusätzlich durch feiner unterteilte Steuerflächen ersetzt, verspricht man sich eine besonders hohe aerodynamische Leistungsfähigkeit.



Widerstandsreduktion

Aerodynamische Verbesserungen von Flugzeugen zielen darauf ab, das Verhältnis zwischen Auftrieb und Luftwiderstand (Gleitzahl) eines Flugzeuges zu verbessern. Je höher die Gleitzahl, umso geringer ist der Energieverbrauch bei gleicher Transportleistung (Reichweite, Nutzlast). Eine hohe Gleitzahl wird bei einer bestimmten Geschwindigkeit erreicht, die von der Flughöhe abhängt. In niedrigerer Höhe, bei höherer Luftdichte, muss man langsamer fliegen um das Flugzeug im Punkt der besten Gleitzahl zu betreiben.

Eine weitere Stellschraube ist die Umströmung der Flügel und des Rumpfes. Werden Tragflügel, wie heutzutage üblich, weitgehend turbulent umströmt, erhöhen sich dadurch der Widerstand, der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen. Durch sogenannte Laminarhaltung sollen Tragflügel über weite Strecken möglichst glatt und wirbelfrei umströmt werden. Dies benötigt allerdings sehr glatte Oberflächen, was die Fertigung eines Flügels deutlich aufwändiger und teurer macht und häufiges Reinigen erfordert.

Gewichtsreduktion durch Leichtbau

Durch eine verbesserte Flugzeugstruktur wird versucht, das Leergewicht eines Flugzeugs bei gleicher Belastbarkeit zu senken. Dies ist in der Luftfahrt von besonderer Bedeutung, da das Gewicht des Flugzeugs durch den aerodynamischen Auftrieb getragen werden muss, im Gegensatz zu bodengebundenen Fahrzeugen, bei denen das Gewicht vom Untergrund getragen wird.

Konsequenter Leichtbau mit integrierten Systemen ist daher notwendig, um alle technologischen Verbesserungen am Flugzeug voll ausschöpfen zu können. Jedes Kilogramm Gewicht, das eingespart werden kann, verringert den benötigten Auftrieb, dadurch den Luftwiderstand und letztlich den Kraftstoffverbrauch. Wenn weniger Kraftstoff verbraucht wird, muss auch weniger getankt werden, wodurch sich das Gewicht weiter verringert. Technologien mit direktem Bezug auf eine Reduktion des Luftfahrzeuggesamtgewichts umfassen neuartige Materialien, Produktions- und Wartungstechnologien.

Kontrolle von Stabilität und Belastung sowie Optimierung der Bordsysteme

Technologien der Lastabminderung zielen darauf, durch genau berechnete Steuerimpulse die Kräfte zu verringern, die auf die Flugzeugstruktur wirken, und ermöglichen dadurch noch leichtere Bauweisen. Derartige Systeme sind notwendig, um beispielsweise die aerodynamischen Vorteile eines hochgestreckten Flügels voll ausschöpfen zu können und diese nicht durch zu hohe Flügelmasse zu gefährden. Geeignete elektrische Flugsteuerungssysteme und Sensoren ermöglichen zudem die optimale Ausnutzung solcher lastadaptiver Flügel.

Integration neuer Vortriebstechnologien und benötigter Systeme für neue Kraftstoffe

Auch die Verwendung neuer Energieträger, wie Batterien oder Wasserstoff, eröffnet Möglichkeiten, Flugzeuge emissionsärmer zu gestalten. So wird beispielsweise über die Einführung von verteilten elektrischen Antrieben oder hybriden Antriebssträngen diskutiert. Damit Wasserstoff als Energiequelle genutzt werden kann, gilt es u.a. neue Tanksysteme zu entwickeln und zu erproben. Wasserstoff gasförmig zu speichern, ist mit hohem Platzbedarf verbunden, ihn bei minus 253 °C flüssig zu halten, kostet Energie und erfordert eine gute Wärmedämmung und ein Sicherheitskonzept. Ebenso braucht es Kühlkonzepte für die Verwendung von Brennstoffzellen und elektrischen Systemen.

Wie lange ist die durchschnittliche Lebensdauer von einzelnen Flugzeugtypen?

Einzelne Flugzeugmuster werden oft über viele Jahrzehnte produziert (im Falle der Boeing 747 beispielsweise über 50 Jahre) und dabei stetig durch neue Varianten an den fortschreitenden Stand der Technik angepasst. Durch entsprechende Wartung können ausgelieferte Flugzeuge etwa 30 Jahre lang wirtschaftlich betrieben werden. Im direkten Vergleich zu anderen Branchen, wie z.B. der Automobilindustrie, ist die Erneuerung der operierenden Flotten somit ein langsamer Prozess.

Konfigurationen

Die Herausforderung bei der Entwicklung neuer Flugzeuge liegt darin, die oben genannten Technologien sinnvoll zu kombinieren, geeignete Flugzeugkonfigurationen zu identifizieren und optimierte Gesamtflugzeugentwürfe unter Berücksichtigung der Technologien, insbesondere der alternativen Antriebskonzepte, zu realisieren.

Um gezielt auch die Nicht-CO₂-Effekte von Flugzeugen zu reduzieren, bestehen weitere Konzeptansätze darin, die Erkenntnisse der Atmosphärenforschung direkt in den Flugzeugentwurf zu integrieren. Werden zukünftige Flugzeuge explizit für klimafreundlichere (geringfügig niedrigere) Flughöhen und Reisegeschwindigkeiten ausgelegt, können Effizienzverluste, die beim Betrieb der Flugzeuge in tieferen Flughöhen entstehen, besser ausgeglichen werden. Dabei müssen Implikationen auf Flugverkehrsmanagement sowie Reisezeiten im Blick behalten werden.

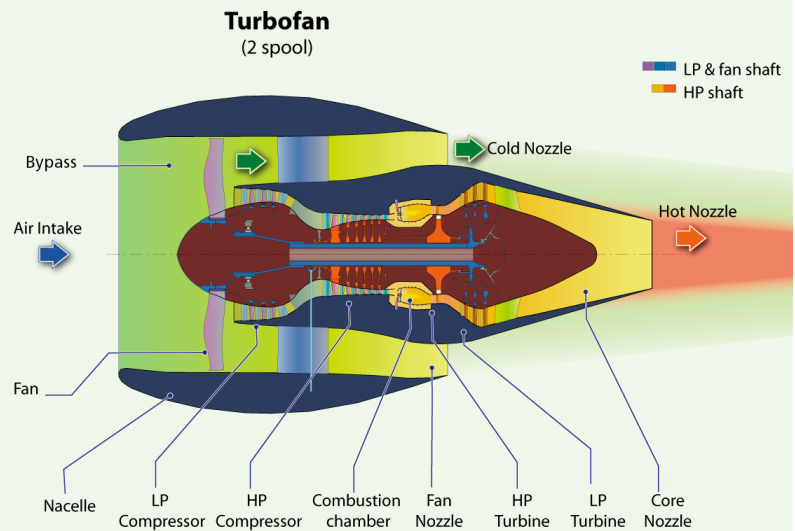
Allerdings ist aufgrund der verhältnismäßig langen Produktzyklen in der Luftfahrt nicht mit einer Einführung vollkommen neuartiger Flugzeugtypen in den nächsten 10 Jahren zu rechnen.

Um die Klimaziele der EU („Green Deal“) zu erreichen, müssten zukünftige Flugzeuge bis zum Jahr 2050 derart verbessert werden, dass nur noch die Hälfte der heutigen Antriebsleistung benötigt wird. Gegenwärtige Studien zeigen, dass dies über eine Reduktion des aerodynamischen Widerstands um mehr als 40 % und eine Reduktion des Flugzeuggesamtgewichts um 10 % erreicht werden könnte. Um die hierfür notwendigen Technologien bestmöglich in ein Flugzeugkonzept integrieren zu können, müssen sie bereits von Beginn an bei der Entwicklungsarbeit berücksichtigt werden.

Funktionsweise eines Strahltriebwerks

Alle modernen Strahltriebwerke bestehen aus einem Kerntriebwerk, in dem die Verbrennung des Kraftstoffs mit einem kleinen Anteil der angesaugten Luft erfolgt, um die Antriebsenergie zu erzeugen. Der größere Teil der Luft strömt in einem äußeren Ringkanal, Bypass genannt, um dieses Kerntriebwerk herum und wird nur durch das erste Schauflrad des Triebwerks, das als Fan bezeichnet wird, verdichtet und beschleunigt. Durch diese Beschleunigung der Luft wird eine Vortriebskraft erzeugt, die als Schub bezeichnet wird und den Antrieb des Flugzeugs bewirkt.

Die Energie zum Antrieb des Fans wird vom Kerntriebwerk geliefert. Das Verhältnis aus dem Luftmassenstrom durch den Bypass und durch den Kern wird als Nebenstromverhältnis bezeichnet und erreicht bei modernen Triebwerken einen Wert von 10 und höher.



Quelle: Wikipedia, 2023, CC BY-SA 3.0

4.2 Emissionsarme Antriebe

Eine Reduzierung der CO₂-Emissionen der Flugzeugtriebwerke kann durch Verringerung des Kraftstoffverbrauchs oder durch die Verwendung von Kraftstoffen mit geringerem Kohlenstoffanteil (z.B. SAF oder Wasserstoff, siehe Abschnitt 4.3) erreicht werden.

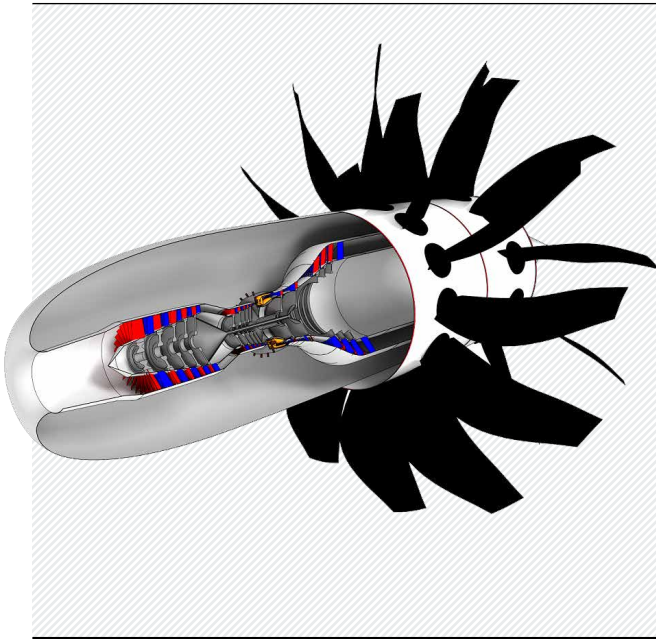
Turbo-Antriebe

Im Bereich der klassischen Turbo-Antriebe kann der Kraftstoffverbrauch, und damit die CO₂-Emissionen, durch eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Strahltriebwerks gesenkt werden. Dieser setzt sich zusammen aus dem thermischen Wirkungsgrad der Energieumwandlung im Triebwerksprozess und dem Vortriebswirkungsgrad. Jede Effizienz-Verbesserung von Flugzeugtriebwerken muss auf einen oder beide dieser Wirkungsgrade abzielen. Für die Gesamteffizienz eines Flugzeugs sind zusätzlich auch das Gewicht (Leichtbau) und die Größe des Triebwerks (Aerodynamik) relevant, da beide zum Luftwiderstand des Flugzeugs beitragen.

Der thermische Wirkungsgrad der Energieumwandlung im Kerntriebwerk wird bestimmt durch seine Höchsttemperatur, sein Gesamtdruckverhältnis und die Wirkungsgrade der Verdichter- und Turbinenkomponenten des Triebwerks. Die erreichbare Höchsttemperatur und das Gesamtdruckverhältnis sind durch physikalische Grenzen limitiert. So liegen die Spitzentemperaturen in modernen Triebwerken weit über der Schmelztemperatur der verwendeten Materialien, die daher durch ausgefeilte Kühlungsverfahren und Wärmedämmschichten geschützt werden müssen. Hier wird an neuen, hoch temperaturbeständigen Materialien und fortschrittlichen Kühlungstechnologien geforscht, um weitere Effizienzverbesserungen zu ermöglichen. Auch die Kontrolle der NO_x-Produktion wird durch Druck- und Temperaturerhöhung schwieriger und kann unter Umständen bewirken, dass die Möglichkeiten der Technologien zur CO₂-Reduzierung nicht voll ausgeschöpft werden können.

Abbildung 14

Konzept eines Open Rotor Triebwerks



Quelle: eigene Darstellung, DLR

Der Vortriebswirkungsgrad ist ein Maß dafür, wie effizient die am Arbeitsmedium des Triebwerks (=Luft) geleistete Arbeit in Vortriebsleistung (=Schub) umgewandelt wird. Eine Verbesserung dieses Wirkungsgrads kann durch eine geringere Geschwindigkeit des Schubstrahls erreicht werden. Dafür muss die vom Triebwerk beschleunigte Luftmasse erhöht werden, um den gleichen Schub zu erzeugen. Dies bedeutet eine Erhöhung des Bypass- oder Nebenstromverhältnisses (siehe Kasten Seite 33) und ist mit einem größeren Triebwerksdurchmesser und einem höheren Gewicht verbunden, was die Gesamteffizienz des Flugzeugs beeinträchtigt. Dem kann zum Teil durch innovative Verbund-Werkstoffe und optimierte Bauteile begegnet werden. Auch eine hohe Leistungsdichte des Kerntriebwerks kann diesen Effekt teilweise ausgleichen, erfordert aber wiederum höhere Prozessdrücke und -temperaturen, welche zu Herausforderungen bei der Kontrolle der NO_x -Emissionen führen. Einen Extremfall dieser Entwicklung stellt das Propellertriebwerk dar, bei dem nur noch ein sehr geringer Unterschied zwischen Flug- und Strahlgeschwindigkeit besteht. Dadurch können allerdings Propellerflugzeuge auch nicht so hohe Geschwindigkeiten erreichen. Sogenannte Open Rotor-Triebwerke (Abbildung 14) stellen einen Kompromiss in dieser Hinsicht dar, wobei hier noch Forschungsarbeit zu leisten ist.

Weiteren Verbesserungen im Bereich der Turbo-Antriebe sind hier durch die Anforderungen zur Integration des Triebwerks in das Flugzeug technische Grenzen gesetzt. Noch größere Triebwerke können nicht mehr unter dem Flügel installiert werden und benötigen unter Umständen ganz andere Flugzeugkonfigurationen.

Als mögliche Alternativen dazu werden bei Kurzstrecken- und Regionalflugzeugen sogenannte verteilte Antriebe diskutiert, bei denen entweder ein Kerntriebwerk mehrere, kleinere, über den Flügel verteilte Fans antreibt oder diese Fans von eigenen Elektromotoren angetrieben werden (siehe Abbildung 15). Diese Konzepte sind in der technischen Umsetzung deutlich komplexer und wahrscheinlich auch schwerer als konventionelle Triebwerke, was Auswirkungen auf den Gesamtflugzeugentwurf hat.

Elektrische Komponenten, Brennstoffzellen und hybridelektrische Antriebe

Um z.B. derartig verteilte elektrische Antriebe realisieren zu können, werden derzeit hybridelektrische Antriebskonzepte unter Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen und der Nutzung des elektrischen Stroms in Hochleistungselektroantrieben erforscht. Herausforderungen stellen dabei die Leistung und Leistungsdichte sowie das Systemgewicht dar, weshalb die Technologie noch nicht reif genug ist, um damit größere zivile Verkehrsflugzeuge betreiben zu können. Um in kritischen Flugphasen (vor allem bei Start- und Steigflug sowie Durchstarten nach Landeabbruch) kurzfristig einen höheren Leistungsbedarf zu decken, können zusätzlich Batterien eingesetzt werden. Das Potenzial von weiteren batterieelektrischen Anwendungen wird für zunehmend größere Flugzeuge und für ausgedehntere Flugmissionen untersucht.

Revolutionäre Gasturbinen-Antriebe

Zusätzlich werden auch Technologien erforscht, die auf eine Verringerung der Nicht- CO_2 -Effekte der klassischen Gasturbinen-Triebwerke abzielen. Hier sind z. B. die Magerverbrennung, aber auch revolutionäre Konzepte wie beispielsweise die Wassereinspritzung in der Brennkammer (Water-Enhanced Turbofan, WET) zu nennen, die vor allem eine deutliche Verringerung der NO_x -Emissionen anstreben. Durch neuartige Brennkammerkonzepte bestehen auch weitere Hebel aufgrund der Verringerung der Anzahl von Rußpartikeln (s.o., Abschnitt 2.1), was die Klimawirkung von Kondensstreifen beeinflussen kann.

Abbildung 15

Beispiel für ein Flugzeugkonzept mit verteilten Antrieben, Elektrische Komponenten, Brennstoffzellen und hybrid-elektrische Antriebe

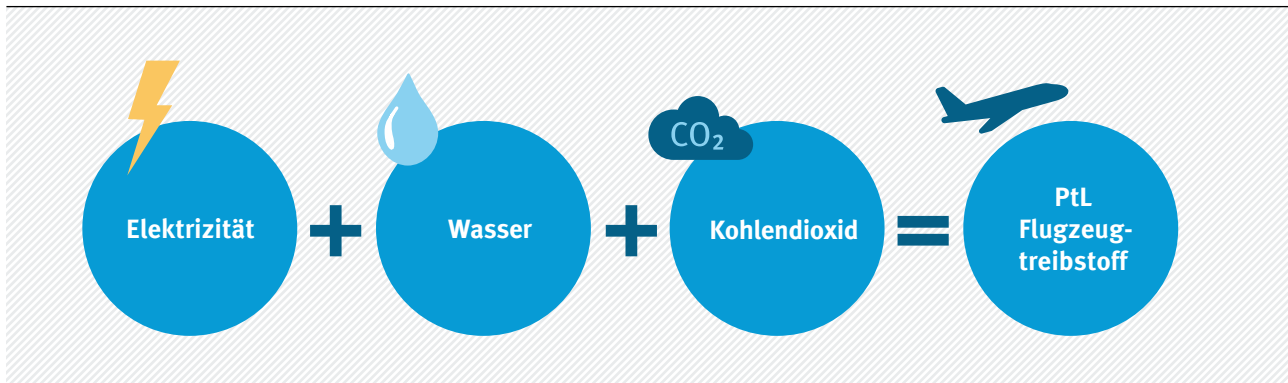
Quelle: eigene Darstellung, DLR

Wasserstofftechnologie und nachhaltig hergestelltes Kerosin (SAF)

Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger im Triebwerk erfordert eine systematische Erforschung und Entwicklung von sicheren, zuverlässigen und schadstoffarmen Wasserstoffbrennern sowie eine sichere Handhabung und Beherrschung von Wasserstoff und einem erhöhten Wasserdampfanteil im Heißgasbereich. Auch die Verbrennung von SAF mit einer veränderten chemischen Zusammensetzung erfordert weitere Forschung- und Entwicklung, wenn SAF bis zu 100 % als Kraftstoff verwendet werden soll.

Abbildung 16

Prinzip der Power-to-Liquid (PtL) Kraftstoffe



Quelle: BHL und LBST, 2021

4.3 Alternative Kraftstoffe

Während konventionelles Kerosin auf Basis von Erdöl hergestellt wird, kann es alternativ auch aus Biomasse (landwirtschaftlichen Abfallprodukten, Hausmüll, eigens angebaute Pflanzen) oder mit Hilfe von Strom aus erneuerbaren Energien („Power to Liquid“, PtL)¹⁷ synthetisch hergestellt werden (Abbildung 16). Bei der PtL-Herstellung wird zunächst Wasserstoff hergestellt (Elektrolyse) und anschließend mit CO₂ in einem chemischen Prozess verbunden. Wasserstoff (H₂) oder Methan (Erdgas) können aber auch direkt als Kraftstoff eingesetzt werden.

Bei alternativen Kraftstoffen wird unterschieden zwischen sogenannten Drop-in-Kraftstoffen, die mit der bereits vorhandenen Infrastruktur und in heute existierenden Flugzeugen und Triebwerken ohne größere Modifikationen eingesetzt werden können, und non-Drop-in-Kraftstoffen, für die eine eigene Versorgungsinfrastruktur installiert und neue Flugzeug- und/oder Triebwerkstypen entwickelt werden müssten. Es liegt auf der Hand, dass letztere erst nach einer Übergangsphase von mehreren Jahren eingeführt werden können, da die Kraftstoffe und die zugehörige Infrastruktur an einer ausreichenden Anzahl an Flughäfen global verfügbar gemacht werden müssen. Drop-in-Kraftstoffe dagegen können und werden auch bereits ohne größere Vorbereitung eingesetzt. Zu den Drop-in-Kraftstoffen gehören alle Mischungen von Kohlenwasserstoffverbindungen aus unterschiedlichen Quellen, die die aktuell gültigen Kraftstoffanforderungen für Strahltriebwerke erfüllen. Bisher sind nur Beimischungen dieser Kraftstoffe zu Kerosin aus fossilen Quellen zulässig, da sie in der Regel keine aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen enthalten. Aromate führen zu einem Aufquellen der in älteren Triebwerken verwendeten Dichtungen, ihr Fehlen könnte daher Undichtigkeiten verursachen. Das Fehlen der aromatischen Kohlenwasserstoffe bringt jedoch auch Vorteile mit sich: z.B. sind aromatische Kohlenwasserstoffe an den Prozessen zur Entstehung von Rußpartikeln beteiligt und Kraftstoffe, die diese Verbindungen nicht enthalten, produzieren bei der Verbrennung deutlich weniger Partikel. Da Drop-in-Kraftstoffe sofort einsetzbar sind, ist ihr Potenzial zur Reduzierung der Partikelemissionen des Luftverkehrs vergleichsweise schnell realisierbar.

Wie hoch sind die Nicht-CO₂-Effekte, wenn Flugzeuge mit Wasserstoff statt mit Kerosin fliegen würden?

Durch die Verbrennung von Wasserstoff wird mehr Wasserdampf ausgestoßen als bei der Verbrennung von Kerosin. Dadurch ist die Wirkung des Wasserdampfs größer und die Wahrscheinlichkeit, dass sich Kondensstreifen bilden, steigt. Andererseits werden deutlich weniger Partikel ausgestoßen und das könnte dazu führen, dass die Wirkung der Kondensstreifen geringer wird, da sich sowohl die Verweildauer verringert als auch optische Eigenschaften verändern. Zudem werden durch die geringere Emission von Aerosolen auch die direkten und indirekten Aerosoleffekte reduziert. Inwieweit die Verbrennung von Wasserstoff die Emission von Stickoxiden reduziert, ist noch unsicher.

¹⁷ PtL-Kraftstoffe werden auch als e-Kerosin oder als strombasiertes Kerosin bezeichnet.

Zu den Non-Drop-in-Kraftstoffen gehören sowohl flüssige Kohlenwasserstoffgemische, die nicht die aktuell gültigen Kraftstoffanforderungen für Strahltriebwerke erfüllen, als auch komprimierte oder verflüssigte Gase, insbesondere Methan (Erdgas) und Wasserstoff (H_2). Diese enthalten zwar einerseits nur wenig (Methan) oder gar keinen (H_2) Kohlenstoff, erfordern aber andererseits eine völlig neue Flughafen-Infrastruktur und auch neue Flugzeugkonzepte, u.a. da das Volumen dieser Kraftstoffe für den gleichen Energiegehalt erheblich größer ist als bei flüssigen Kohlenwasserstoffen. Dies ist insbesondere für Wasserstoff der Fall. Ein Wasserstoffflugzeug von ähnlichen Abmessungen wie ein Airbus A320 oder eine Boeing B737 könnte nur etwa halb so viele Passagiere transportieren, und auch das nur bei reduzierter Reichweite.¹⁸

Für alle alternativen Kraftstoffe gilt, dass sie einen weitgehend CO_2 -neutralen Betrieb der Flugzeuge nur dann ermöglichen können, wenn der Kraftstoff mit regenerativer Energie aus nachhaltigen Quellen erzeugt wird.

Werden in Strahltriebwerken gasförmige anstatt flüssiger Kraftstoffe eingesetzt, können darüber hinaus Technologien zur schadstoffarmen Verbrennung einfacher umgesetzt werden. Rußpartikel entstehen bei der Verbrennung von Wasserstoff nicht und können auch bei Methan wahrscheinlich weitestgehend vermieden werden. Eine sichere Prognose zu den Stickoxidemissionen beim Umstieg auf Methan oder Wasserstoff als Flugkraftstoff kann allerdings vom heutigen Stand aus noch nicht getroffen werden.

4.4 Emissionsreduziertes Lufttransportsystem

Im direkten Vergleich zu technologischen Verbesserungen können operationelle Maßnahmen deutlich kurzfristiger realisiert werden, und in der Regel nicht nur für zukünftige Flugzeugtypen, sondern auch für bestehende angewendet werden. So können aktuelle Fluggeräte bereits heute effizienter (z.B. direkter, höher ausgelastet) betrieben oder gezielt in den Flughöhen und Flugbahnen eingesetzt werden, die nicht nur die Menge an Kraftstoff, sondern die daraus resultierende Klimawirkung minimieren.

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Flugbetriebs

Kraftstoff- und Emissionsmengen lassen sich operationell durch sämtliche Verfahren reduzieren, die auf eine Effizienzsteigerung im Flugbetrieb abzielen. Verbesserungen in der horizontalen und vertikalen Flugeffizienz lassen sich z. B. durch direktere Flugführung (Free Route Airspace) oder durch neuere, direkte An- und Abflugverfahren erzielen. Dabei spielt bereits die Flugplanung unter Verwendung verbesserter Wettervorhersagedaten eine Rolle, die die effiziente Berücksichtigung von Wind (z.B. Ausnutzung von Rückenwind, Vermeidung von Gegenwind) ermöglichen.

Eine Möglichkeit, den Kraftstoffverbrauch von Langstreckenflügen zu reduzieren, besteht in der Aufteilung auf mehrere, kürzere Teilstrecken („Multi“-Stop). Da für jedes zusätzlich transportierte Kilogramm zusätzlicher Kraftstoff benötigt wird,

Abbildung 17

Formationsflug: Das hintere Flugzeug „surft“ auf dem Luftstrom der Wirbelschleppe



Quelle: eigene Darstellung, DLR

18 Görtz, Silberhorn, 2022.

führen so genannte Schneeballeffekte hier zu einer überproportionalen Effizienzmindering bei zunehmender Reichweite.

Effizienzsteigernde Maßnahmen senken allerdings nicht zwangsläufig die Klimawirkung. Die Flughöhe, auf der Flugzeuge ihre maximale Kraftstoffeffizienz erzielen, steigt mit abnehmender Flugzeugmasse. Werden infolge des Zwischenstopps (leichtere) Flugzeuge kraftstoffoptimal in höheren und klimasensitiveren Flughöhen betrieben, kann sich die Klimawirkung trotz sinkender CO₂-Emissionsmengen erhöhen, da die Nicht-CO₂-Effekte im Allgemeinen mit der Flughöhe zunehmen. Dementsprechend leicht können unerwünschte Fehlanreize gesetzt werden, wenn Maßnahmen ausschließlich auf die Reduktion der Klimawirkung einzelner Spurenstoffe (z.B. CO₂-Minimierung) setzen. Werden „Multi“-Stop-Flüge allerdings in tieferen Höhen betrieben, so zeigen Studien,¹⁹ könnte sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte reduziert werden. Multi-Stop-Flüge führen allerdings zu zusätzlichen Starts und Landungen, was wiederum Auswirkungen auf Flugzeugstruktur und Triebwerk, aber auch auf die Flugsicherheit haben kann. Darüber hinaus erhöhen die zusätzlichen Starts und Landungen die Lärm- und Abgasbelastung an den betreffenden Flughäfen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs ist die Einführung von Formationsflug nach dem Vorbild von Zugvögeln. Dadurch, dass der zweite Vogel auf dem Auftriebswirbel des vorausfliegenden Vogels „surft“, sparen die Vögel viel Energie (Abbildung 17). Das gleiche Prinzip funktioniert auch bei Flugzeugen und ist bereits in verschiedenen Flugversuchen demonstriert worden. Erste Studien für eine Formation von zwei Flugzeugen zeigen, dass – würde man Formationsflug zwischen den wichtigsten internationalen Flughäfen einführen – man dadurch regionsübergreifend etwa 5 % des Kraftstoffbedarfs und etwa 24 % der Klimawirkung pro Flug einsparen könnte.²⁰ Der systematischen Nutzung des Formationsflugs steht derzeit jedoch noch eine

Vielzahl technischer und operationeller Aspekte im Wege. So ist z.B. in der Formation mit Turbulenzen zu rechnen, weshalb dies zunächst nur für Frachtflüge sinnvoll erscheint.

Klimawirkungsoptimierte Flugtrajektorien

Operationell lässt sich nicht nur die Emissionsmenge reduzieren, sondern zusätzlich auch orts- und wetterabhängige Effekte vieler Spurenstoffe mindern. So fliegen Verkehrsflugzeuge in Reiseflughöhen zwischen 10 und 15 Kilometern, in denen besonders viele chemische und mikrophysikalische Prozesse ablaufen. Heutzutage wird die optimale Reiseflughöhe eines Fluges für jeden Flug separat berechnet und ist eine rein wirtschaftliche Abwägung zwischen kraftstoff- und flugzeitabhängigen Kosten. Die Wahl der Reiseflughöhe kann allerdings auch unter Berücksichtigung von klimatologischen Effekten erfolgen. Eine Verringerung der Reiseflughöhe führt zwar infolge des zunehmenden Luftwiderstands zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauches und damit zu einem erhöhten Ausstoß von CO₂- und H₂O-Emissionen, andererseits verringert sich dadurch aber sowohl der Kondensstreifen-Bedeckungsgrad als auch die Verweilzeit von Ozon in der Atmosphäre. Insgesamt zeigt sich dadurch eine Abnahme der Klimawirkung für geringere Flughöhen.²¹

Noch effizienter ist die klimaoptimierte Flugplanung. So können beim gezielten Umfliegen von besonders klimasensitiven Regionen (rote Bereiche in Abbildung 18 unten) viele Nicht-CO₂ Effekte vermieden werden. Besonders effizient lässt sich dadurch die Kondensstreifenbildung vermeiden. Hierfür reicht oft ein temporärer Wechsel der Flughöhe von wenigen hundert Metern aus. Bei diesen Ansätzen werden aktuelle Wetter- und Verkehrsvorhersagen nicht nur, wie aktuell üblich, genutzt, um die Flugzeuge auf der wirtschaftlichsten Route einzusetzen (schwarze durchgezogene Linie in Abbildung 18), sondern auch auf eine klimafreundlichere Art und Weise. Da eine rein klimaoptimierte Flugplanung (gepunktete Linie) oft mit deutlichen Zusatzkosten und einem erhöhten

¹⁹ Linke et al., 2017.

²⁰ Marks et al., 2021, Dahlmann et al., 2020.

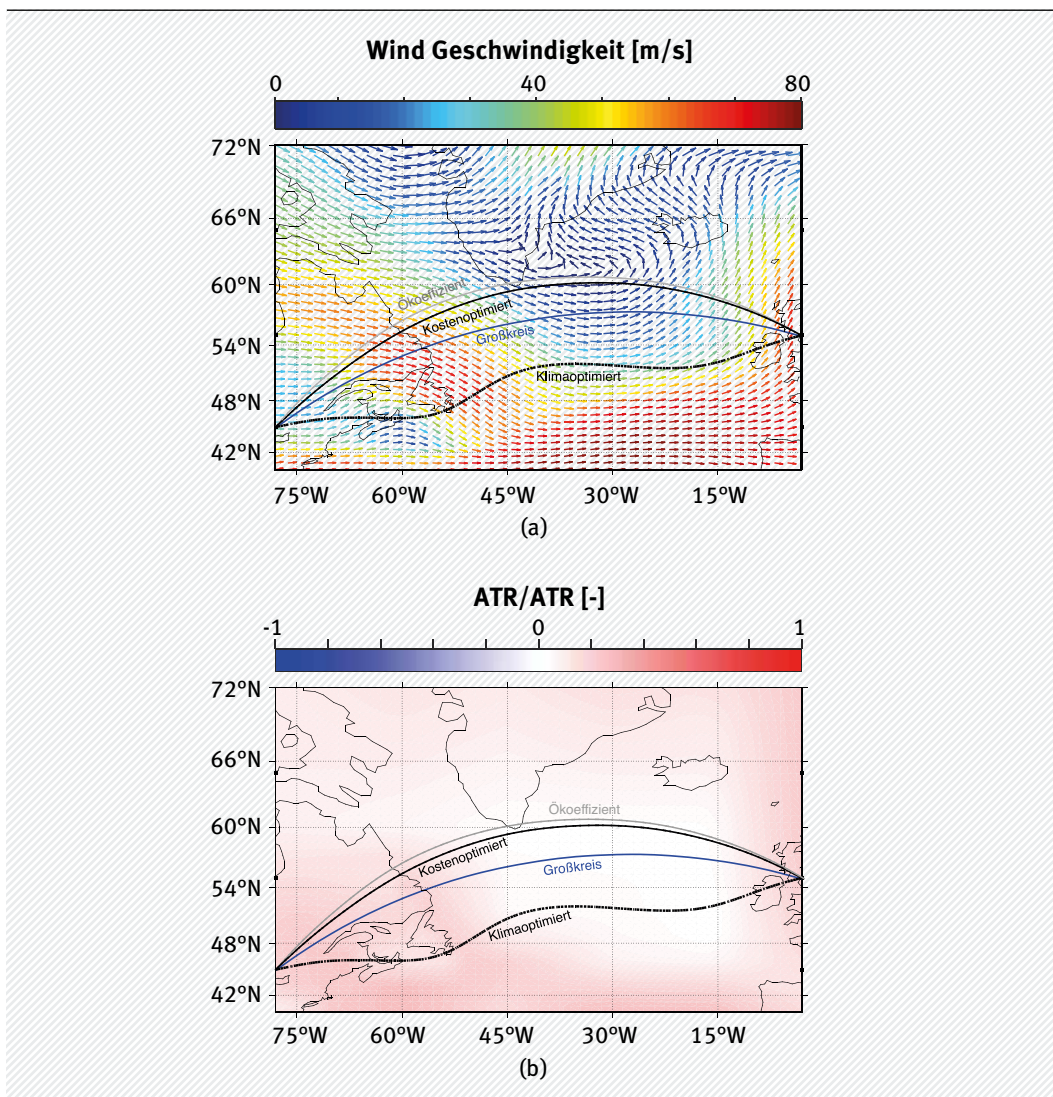
²¹ Dahlmann et al., 2016, Matthes et al., 2021.

Kraftstoffverbrauch verbunden ist, sind ökoeffiziente Flugrouten (gestrichelte Linie) oft ein guter Kompromiss. All dies erfordert eine robuste Vorhersage der Klimawirkung.

Mit heutigen Flugzeugen muss also abgewogen werden, ob man den zusätzlichen Kraftstoffverbrauch für die Reduzierung der Gesamtklimawirkung in Kauf nimmt. Werden zusätzlich neue Antriebe, klimaoptimierte Flugzeugentwürfe oder alternative Kraftstoffe eingesetzt, kann beim Über- oder Unterfliegen von klimasensitiven Regionen zusätzlich auch der CO₂-Verbrauch reduziert werden.

Abbildung 18

Klimaoptimierte Flugführung



Quelle: Lührs et al., 2016

Politische Maßnahmen





Maßnahmen zum Flugzeugentwurf

Maßnahmen für alternative Kraftstoffe

Maßnahmen für klimaverträgliche Flugführung

Übergeordnete Instrumente

5



Politische Maßnahmen

Im vorigen Abschnitt wurden einige Möglichkeiten zur Reduzierung der Klimawirkung des Luftverkehrs dargestellt. Die meisten dieser Maßnahmen führen zu einer höheren Investition (z. B. Anschaffung neuer Flugzeuge) oder zur Erhöhung der Betriebskosten durch steigenden Kraftstoffverbrauch bei alternativer Flugroutenplanung, höheren Kraftstoffkosten für SAF oder verlängerten Flugzeiten. Politische Maßnahmen können einen Anreiz schaffen, neue Technologien und operationelle Maßnahmen zeitnah zu entwickeln und umzusetzen und somit die Klimawirkung des Luftverkehrs zu reduzieren.

Mögliche Zielkonflikte zwischen den relativ kurzfristig und stark wirkenden Nicht-CO₂-Klimaeffekten sowie dem sehr lange klimawirksamen CO₂ können eine besondere Herausforderung sein. Maßnahmen, die nur auf CO₂-Emissionsminderungen abzielen, können aus Klimasicht kontraproduktiv sein. Vor diesem Hintergrund gilt es, Nicht-CO₂- und CO₂-Emissionen gleichermaßen zu berücksichtigen.

Maßnahmen zum Flugzeugentwurf

Die zulässigen Mengen bestimmter Spurenstoffe im Abgas der Flugtriebwerke werden global durch die Emissionsstandards der ICAO reglementiert, die im Annex 16, Vol. II des Abkommens über den internationalen Luftverkehr festgelegt sind. Neben Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen sind hier auch Grenzwerte für Stickoxide und nichtflüchtige Partikel (nvPM) definiert. Diese Standards zielen hauptsächlich auf die Luftqualität im Flughafenumfeld ab und berücksichtigen daher nur Emissionen in Bodennähe. Dennoch wurde gezeigt, dass eine Reduzierung der Emissionen in Bodennähe auch eine Reduzierung der Reiseflug-Emissionen in gleicher Größenordnung bedeutet. Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO gibt in regelmäßigen Abständen eine Überprüfung in Auftrag, ob dieser Zusammenhang nach wie vor gegeben ist.

Während der **ICAO-Standard für nvPM** noch relativ neu ist, wurden die NO_x-Emissionen bereits Anfang der 1980er Jahre erstmals limitiert (**NO_x-Standard**).

Die Grenzwerte wurden seitdem mehrfach verschärft, wobei dabei stets die technische Machbarkeit berücksichtigt wurde. Dennoch haben die Triebwerkshersteller infolge dieser Verschärfungen substantiell in die Erforschung neuer, NO_x-armer Brennkammerkonzepte investiert, welche letztlich auch in einigen der neuesten Produkte zum Einsatz gekommen sind.

Weiterhin hat die ICAO vor einigen Jahren einen CO₂-Standard für Flugzeuge mit unterschiedlichen Grenzwerten für bereits zugelassene und neue Flugzeugtypen erlassen. Dieser ist im Volume III des Annex 16 beschrieben. Für diesen Standard werden jedoch nicht nur die CO₂-Emissionen gemessen und bewertet, sondern es wird ein Metrikwert ermittelt, der ein Maß für die Transporteffizienz eines Flugzeugs darstellt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass Flugzeuge mit gleichem Effizienzniveau, aber unterschiedlicher Transportkapazität, im CO₂-Standard gleich bewertet werden.

Maßnahmen für alternative Kraftstoffe

Alternative Kraftstoffe (SAF) als Ersatz des fossilen Kerosins spielen bei der Verringerung der klimawirksamen Emissionen eine Schlüsselrolle. Allerdings sind wenige dieser Alternativen zu 100 % drop-in-fähig, da ihnen die Zulassung für Strahltriebwerke fehlt. Zulassungsverfahren laufen.

Zum Inverkehrbringen müssen weitere Hürden überwunden werden. Aufgrund der höheren Herstellungskosten im Vergleich zu fossilem Kerosin kommen die Kraftstoffe nicht automatisch in ausreichender Breite an den Markt. Es wurden und werden Maßnahmen etabliert, die sowohl die Eignung der SAF sicherstellen, als auch die Produktion anreizen und den Absatz sicherstellen.

Zulassung von Kraftstoffen

Bevor neue Kraftstoffe eingesetzt werden können, muss ihr sicherer Einsatz in allen Betriebszuständen nachgewiesen sein. Die Tests und die Zulassungen durch die ASTM (American Society for Testing and Materials) sind umfangreich und ziehen sich über Jahre. Derzeit befinden sich eine Reihe von Kraftstoffen im Zulassungsprozess.²²

²² Details in BHL und LBST, 2021, Abschnitt 2.2.

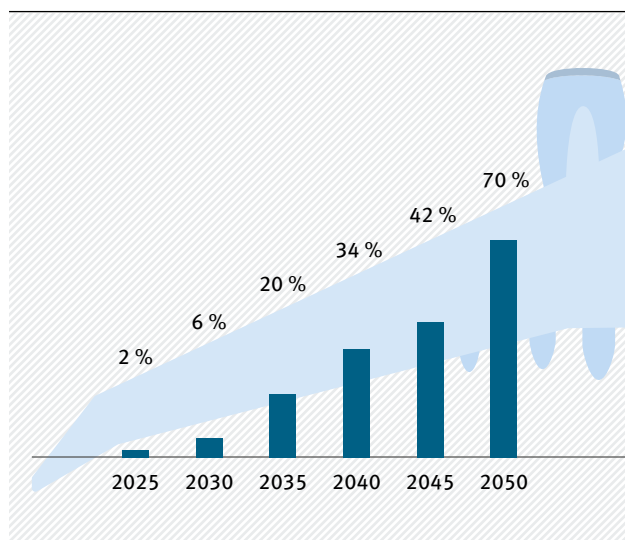
Nachfrageanreize

Eine der Gesetzesinitiativen des Fit-for-55-Pakets der Europäischen Kommission ist **ReFuelEU Aviation**.²³ Diese Initiative wurde zwischen den europäischen Institutionen – Kommission, Parlament und Rat – verhandelt und könnte 2025 in Kraft treten.

Darin wird eine Mindestquote alternativer Kraftstoffe (SAF) an der Gesamtmenge getankter Kraftstoffe für jedes in der EU tankende Flugzeug vorgeschrieben. Flugkraftstoffanbieter an EU-Flughäfen müssen den Anteil an SAF schrittweise erhöhen, beginnend mit 2 % 2025 bis auf 70 % im Jahr 2050 (Abbildung 19). Flughäfen werden verpflichtet, für die erforderliche Lieferung, Lagerung und Betankung mit nachhaltigen Flugkraftstoffen zu sorgen. Neben der allgemeinen Quote für SAF wird eine ab 2030 allmählich steigende Unterquote für PtL aufgenommen. Sie steigt auf bis zu 35 % 2050.

Abbildung 19

Anteil an SAF gemäß Vorschrift ReFuel EU Aviation



Quelle: Eigene Darstellung, DLR, basierend auf EU-Kommission (2021)

Für in Deutschland startende Flüge wurde bereits 2021 eine PtL-Mindestquote zur Beimischung zu Flugturbinenkraftstoffen gesetzlich verankert. Ab 2026, beginnend mit 0,5 %, steigt der Anteil sukzessive auf 2 % bis 2030.

Maßnahmen für klimaverträgliche Flugführung

Von der Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit (EASA) wurden im Jahr 2020 im Rahmen einer Studie für die EU-Kommission²⁴ als Maßnahmen zur Vermeidung von Nicht-CO₂-Emissionen durch klimaverträgliche Flugführung die „**Vermeidung von eisübersättigten Regionen im Luftraum**“ und die Einführung einer sog. „**Klimaabgabe**“ („climate charge“) vorgeschlagen. Beide Maßnahmen setzen Anreize zu einer klimafreundlichen Flugroutenplanung. Das Ziel der erstgenannten Maßnahme ist es, die individuellen Flugrouten möglichst bei der Flugplanung so zu optimieren, dass klimasensitive Regionen in der Atmosphäre bestmöglich umflogen werden. Hierdurch könnte insbesondere die Bildung von Kondensstreifen-Zirren reduziert werden. Im Unterschied dazu würde eine „Klimaabgabe“ alle Nicht-CO₂-Effekte gleichzeitig adressieren. Insgesamt könnten beide vorgeschlagene Instrumente somit wirksame Anreize zur Vermeidung von Nicht-CO₂-Effekten setzen. Die EASA sieht hier noch eine Reihe offener Fragen, die vor einer Einführung dieser Instrumente untersucht werden sollten, um wissenschaftliche Unsicherheiten insbesondere im Bereich der Atmosphärenforschung zu reduzieren. Die EASA schätzte im Jahr 2020, dass Maßnahmen zur Vermeidung von klimasensitiven Regionen der Atmosphäre demnach eher mittelfristig (in 5 bis 8 Jahren) eingeführt werden können. Eine „Klimaabgabe“ würde aufgrund aktuell noch offener Fragen erst langfristig (in mehr als 8 Jahren) implementiert werden können.

²³ Europäische Kommission, 2023.

²⁴ Europäische Kommission, 2020.

Ein anderes mögliches Instrument zur Einführung von klimaverträglichen Flugrouten ist die Einführung von sog. „**Klimamautgebieten**“. Das vom DLR entwickelte Instrument könnte ebenfalls Anreize für einen klimafreundlicheren Luftverkehr auslösen.²⁵ Hierbei soll die Klimawirkung auf Einzelflugebene, abhängig von der aktuellen Wettersituation vor dem jeweiligen Flug, berechnet werden. Je nachdem, wie stark die Klimawirkung des Fluges ist, muss der Flugzeugbetreiber mehr oder weniger Maut für das Durchfliegen von vorab definierten „Klimamautgebieten“ zahlen. Der Flugzeugbetreiber kann dann individuell entscheiden, ob er die klimasensitiven Regionen umfliegt und dadurch weniger Klimamaut bezahlt oder aber die Zusatzkosten in Kauf nimmt und durch diese Region fliegt. Hierdurch könnte ein ökonomischer Anreiz zu einer klimafreundlichen Flugplanung und -durchführung gesetzt werden, so dass insbesondere die Nicht-CO₂-Effekte reduziert werden.

Ein weiteres, oftmals diskutiertes Instrument wäre die Einführung einer **Flughöhenbeschränkung**. Hierdurch würden insbesondere die Nicht-CO₂-Effekte reduziert. Wie auch die o.g. Maßnahmen, die zu einer längeren Flugstrecke führen, dürfte auch das Tieferfliegen im Gegenzug zu einer leichten Erhöhung der luftverkehrsbedingten CO₂-Emissionen führen, da in tieferen Luftschichten ein erhöhter Luftwiderstand besteht, was den Kerosinverbrauch erhöht. Hier entsteht somit eine sog. Trade-off-Problematik zwischen der Reduzierung von Nicht-CO₂- und CO₂-Emissionen. Zudem ist davon auszugehen, dass eine Flughöhenbegrenzung in stark frequentierten Lufträumen, wie z. B. in Europa, schwierig umzusetzen sein und Anreize zu Umwegen bei der Flugplanung setzen wird.

Übergeordnete Instrumente

Seit 2012 wurden sogenannte marktbasierende Maßnahmen zur Begrenzung von klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs eingeführt. Allerdings konzentrieren sich diese Maßnahmen bislang auf die Reduktion von luftverkehrsbedingten CO₂-Emissionen.

In Europa werden die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) seit dem Jahr 2012 vom EU-Emissionshandel (EU-ETS) erfasst, d.h. Airlines müssen für jede von ihnen emittierte Tonne CO₂ eine Emissionsberechtigung abgeben. Abbildung 21 veranschaulicht das Grundprinzip eines CO₂-Emissionshandels. Die Emissionsobergrenze für den Luftverkehr („Cap“) betrug bis zum Jahr 2020 95 % der durchschnittlichen ETS-relevanten CO₂-Emissionen der Jahre 2004 bis 2006. Seit dem Jahr 2021 wird das Cap jährlich um 2,2 % reduziert, ab den Jahren 2024 und 2028 beträgt die jährliche Reduzierung dann 4,3 % bzw. 4,4 %. Es besteht eine Zukaufmöglichkeit von Emissionsberechtigungen aus anderen am EU-ETS teilnehmenden Wirtschaftssektoren, was aufgrund der relativ hohen Vermeidungskosten im Luftverkehr dazu führt, dass CO₂-Emissionsminderungen eher in anderen Sektoren als dem Luftverkehr stattfinden.

Durch die Änderung der Emissionshandels-Richtlinie im Mai 2023 werden die Regelungen für den Luftverkehr auf EU-Ebene deutlich verschärft.²⁶ Insbesondere wird das Cap und die Menge der kostenlos zugeteilten Emissionsberechtigungen weitergehend mit der Folge gesenkt, dass ab 2026 jegliche Emissionsberechtigungen erworben werden müssen. Die Einnahmen aus den Auktionserlösen sollen laut EU-Kommission zur Forschung und Entwicklung für den Klimaschutz eingesetzt werden. Darüber hinaus soll der Einsatz von SAF gefördert werden. Die Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs sollen ab dem Jahr 2025 von allen Luftfahrzeugbetreibern gemäß (bis 2024) noch zu erstellender MRV (Monitoring, Reporting and Verification)-Regeln auf Einzelflugbasis erfasst und berichtet werden. Bis Ende 2027 sollen zudem auch Regelungen für eine vollständige Einbindung der Nicht-CO₂-Effekte, d.h. Regelungen mit einer Pflicht zur Abgabe von Emissionsberechtigungen auch für die

²⁵ z.B. Niklaß, 2019.

²⁶ Europäische Kommission, 2023.

Nicht-CO₂-Spezies, z.B. Kondensstreifen (deren Klimawirkung dafür zunächst in CO₂-Äquivalente umgerechnet wurde), vorgelegt werden.

Auf globaler Ebene wurde im Jahr 2016 in der ICAO-Resolution A39-3 erstmals die Einführung einer globalen marktbasierenden Klimaschutzmaßnahme für den internationalen Luftverkehr (**Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA**) beschlossen.

Im Rahmen von CORSIA werden bestimmte CO₂-Emissionen des internationalen Luftverkehrs kompensiert, d.h. es müssen Emissionsgutschriften („Offsets“) aus anerkannten Projekten für CO₂-Minderungen gekauft und gelöscht werden. Dies gilt von 2021 bis 2023 für Emissionen, die über das Niveau von 2019 hinausgehen. Ab 2024 beträgt die Basislinie dann 85 % der Emissionen von 2019. Anzuwenden ist dies seit 2021 auf Routen zwischen freiwillig teilnehmenden Staaten. Ab 2027 gilt CORSIA für alle großen Luftverkehrsstaaten verpflichtend.

Allerdings ist CORSIA deutlich weniger ambitioniert im Hinblick auf die CO₂-Reduktionsvorgaben als das EU-ETS für den Luftverkehr. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass CORSIA auf ein CO₂-neutrales Wachstum ab dem Jahr 2020 abzielt, während das aktuell geltende EU-ETS bereits an den gesamten CO₂-Emissionen der Jahre 2004 bis 2006 ansetzt und diese reduziert.

Anders als auf europäischer Ebene gibt es auf ICAO-Ebene zurzeit keine konkreten Planungen zur Einbeziehung der Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs in CORSIA.

Als weitere Maßnahme hat die EU-Kommission im Sommer 2021 im Rahmen des sog. Fit-for-55-Pakets die Einführung einer **Kerosinsteuer** vorgeschlagen. Sie soll stufenweise eingeführt werden und im Maximum im Jahr 2033 0,45 € pro kg Kerosin betragen. Die Steuer soll auf alle Intra-EU-Flüge (mit Ausnahme von reinen Frachtflügen) erhoben werden. Gegenwärtig unterliegt Kerosin für den gewerblichen Luftverkehr sowie für internationale Flüge keiner Besteuerung. Die Kerosinsteuer würde einen ökonomischen Anreiz zur

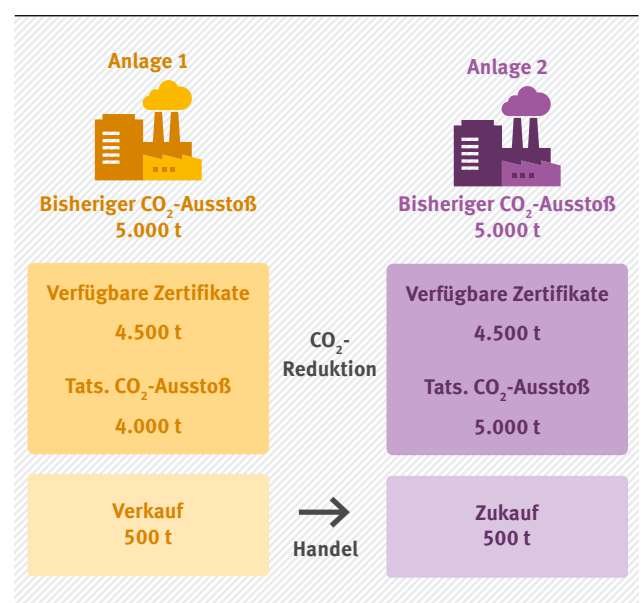
Einsparung von Flugkraftstoffen und somit indirekt auch zur Vermeidung von CO₂ auslösen. Allerdings bedarf die von der EU-Kommission vorgeschlagene Einführung einer neuen EU-Energiesteuer der einstimmigen Zustimmung aller EU-Mitgliedsstaaten. Vor diesem Hintergrund bleibt die Zukunft dieses Kommissionsvorschlags abzuwarten.²⁷

Grundsätzlich ist bei allen übergeordneten luftverkehrsbezogenen Maßnahmen, die ausschließlich auf die Vermeidung von CO₂-Emissionen abzielen, zu beachten, dass auch hier die oben erwähnte Trade-off-Problematik besteht, also ein Zielkonflikt zwischen der Vermeidung von CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten im Luftverkehr. So spricht vieles dafür, dass die Fokussierung auf die CO₂-Emissionen zu strategischen Ausweichreaktionen der Fluggesellschaften führen kann, die beispielsweise darin bestehen, länger in höheren Flugleveln zu fliegen, in denen die Klimawirkung höher ist.

Um alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs wirksam zu begrenzen, sollten politische Instrumente somit sowohl die CO₂- als auch die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs gleichermaßen adressieren.

Abbildung 20

Grundprinzip eines CO₂-Emissionshandels



Quelle: Umweltbundesamt (2022)

27 Europäische Kommission, 2021.

Handlungsmöglichkeiten der Reisenden: Was kann jede/r Einzelne tun?



6



Handlungsmöglichkeiten der Reisenden: Was kann jede/r Einzelne tun?

Handlungsmöglichkeiten seitens der Reisenden können ergänzend dazu beitragen, die Klimawirkung des Luftverkehrs zu reduzieren. Hierbei stellt die differenzierte Betrachtung zwischen Nicht-CO₂-Effekten und den Effekten von CO₂ die Reisenden vor einige Herausforderungen.

Laut einer für die deutschsprachige Wohnbevölkerung repräsentativen Umfrage im Jahr 2018 sind in den zwei Jahren zuvor 43 Prozent der Befragten geflogen.²⁸ Somit ergibt sich eine große Bevölkerungsgruppe, deren Handlungsmöglichkeiten potentiell Einfluss auf die Klimawirkung des Luftverkehrs haben könnte.

Eine Möglichkeit, die Klimaeffekte des Luftverkehrs individuell und freiwillig zu reduzieren besteht darin, die individuelle Reiseplanung auf Basis fundierten Wissens zu treffen. Deshalb sollten Reisende die Gelegenheit haben, sich über die Klimawirkung der unterschiedlichen Fluggesellschaften und alternativen Verkehrsmittel informieren zu können. So könnte bei der Wahl der Fluggesellschaft darauf geachtet werden, dass moderne Flugzeuge, alternative Kraftstoffe oder operationelle Maßnahmen zur Reduzierung der Klimawirkung eingesetzt werden.

Was muss beim Vergleich der Klimawirkung verschiedener Verkehrsmodi beachtet werden?

Bei der Verkehrsmittelwahl (z.B. Bus, Bahn, Auto, Flugzeug) müssen die Emissionen über den gesamten (Produkt-) Lebenszyklus berücksichtigt werden. Zusätzlich zum Betrieb entstehen Emissionen auch bei der Produktion und Entsorgung des Verkehrsmittels, sowie beim Bau und der Instandhaltung der Infrastruktur (z. B. Straße, Schiene, Flughafen). Je nachdem, wie die Systemgrenze dabei gezogen wird, unterscheidet sich die Klimabilanz der einzelnen Verkehrsmodi. So werden beispielsweise die Wege vom Wohnort zum Flughafen, teilweise dem verwendeten Verkehrsmodus (z. B. Bus, Bahn, Auto) zugeordnet und teilweise direkt dem Luftverkehr, der für die Fahrt zum Flughafen auch Bodeninfrastruktur nutzt.

Laut Umweltbundesamt könnte auf Kurzstrecken und kurzen Zubringerflügen gegebenenfalls auf klimafreundlichere Verkehrsmittel wie zum Beispiel Züge oder Reisebusse zurückgegriffen werden.²⁹

Touristen könnten bewusster reisen und auf die Gesamtklimawirkung ihrer Reisetätigkeit achten. Unternehmen ersetzen bereits Dienstreisen teilweise durch Videokonferenzen. Die Vermeidung der Emissionen ist einer Kompensation der Klimawirkung vorzuziehen.²⁹

Alternativ können die Emissionen eines Fluges freiwillig durch Emissionsminderungsgutschriften (s.g. Zertifikate oder Offsets) kompensiert werden. Hierbei werden Gutschriften entsprechend der Klimawirkung einer Reise bei Klimaschutzprojekten erworben, die Treibhausgasemissionen reduzieren oder der Atmosphäre entziehen (z. B. Windkraftanlagen oder Aufforstungsprojekte in Entwicklungsländern). Diese Möglichkeit wird während des Buchungsprozesses bereits von zahlreichen Fluggesellschaften angeboten. In diesem Fall kooperiert die Airline mit einem Anbieter für Kompensationsangebote und erwirbt im Auftrag der Passagiere Offsets, die den CO₂-Emissionen des gebuchten Fluges entsprechen. Alternativ können Flugreisende auch selbständig Offsets bei einer Vielzahl von Anbietern direkt erwerben. Oftmals bieten entsprechende Anbieter auf ihren Internetseiten Tools an, mit denen sich die zu erwartenden CO₂-Emissionen eines Fluges berechnen lassen. Nicht-CO₂-Effekte werden häufig noch nicht berücksichtigt. Flugreisende könnten jedoch freiwillig die zum Beispiel doppelte bis dreifache Menge an Offsets erwerben oder sich bei Anbietern wie Atmosfair oder der Klima-Kollekte Nicht-CO₂-Effekte eines individuellen Fluges berechnen lassen, um diese näherungsweise zu kompensieren.

Problematisch ist beim Offseterwerb, dass es eine Fülle von Anbietern gibt und keine gesetzlichen Mindeststandards für Offsets existieren. Der Markt ist deshalb überschwemmt von extrem günstigen Offsets mit teilweise zweifelhaften ökologischen und sozialen Eigenschaften.

²⁸ BDL, 2018.

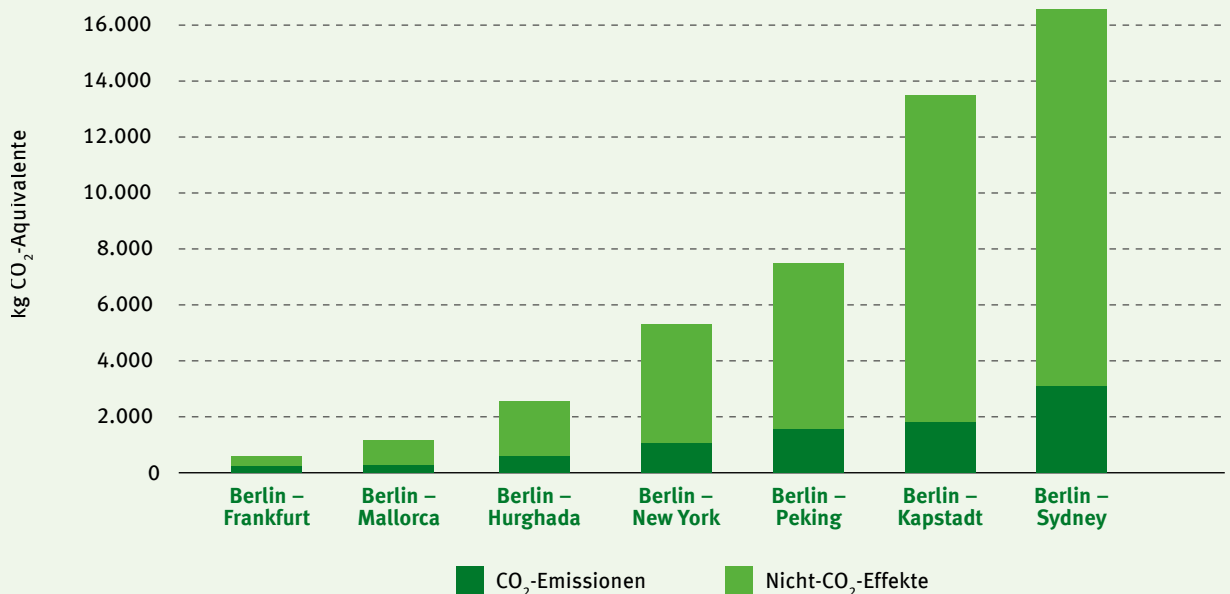
²⁹ Umweltbundesamt, 2020.

Warum unterscheiden sich die Preise von Offsets so stark?

Die Qualität und die Art eines Klimaschutzprojektes beeinflussen den Preis stark. Teuer muss hierbei nicht zwangsläufig klimafreundlich sein, da sich die Produktionskosten je nach Projektgröße, -region oder typ sehr unterscheiden können. Deshalb können die Offsetpreise auch innerhalb eines Zertifizierungsstandards stark abweichen, obwohl die gleichen Anforderungen erfüllt werden. Airlines stehen für freiwillige Offsets vor dem gleichen Problem, haben aber durch CORSIA ggf. bereits Erfahrungen mit dem Offsetmarkt machen können. Zudem unterliegen die unter CORSIA zugelassenen Programme/Standards Mindestanforderungen, die vor missbräuchlichen Anbietern schützen sollen. Die Standards mit dem größten Offsetvolumen sind der „Clean Development Mechanism“, der „Verified Carbon Standard“ und der „Gold Standard“. Reisende können entsprechend zertifizierte Offsets entweder direkt bei diesen Standards auf deren Homepage erwerben oder beim Kauf über Drittanbieter auf diese Standards achten.

CO₂-Äquivalente für einzelne Flugreisen

In folgender Tabelle sind die CO₂-Äquivalente für verschiedene Flugreisen dargestellt. Diese wurden auf Basis des DLR Simplified CO₂e Estimators für Hin- und Rückflüge in der Metrik ATR100 berechnet.³⁰ Zum ungefähren Vergleich: die jährlichen deutschen Treibhausgasemissionen pro Kopf betragen etwa 10.340 kg CO₂ Äquivalente pro Jahr³¹. Die jährlichen CO₂-Emissionen des deutschen Straßenverkehrs pro Pkw, bei einer Fahrleistung von 13.600 km, betragen etwa 2.045 kg. Beim Straßenverkehr spielen die Nicht-CO₂-Effekte nur eine untergeordnete Rolle. Da die Wegstrecken insbesondere bei Langstreckenflügen die durchschnittliche jährliche Fahrleistung eines Pkw übersteigen, kann die Klimawirkung einer einzelnen Langstrecken-Flugreise bereits höher sein als bei einem Jahr Autofahren. Dabei ist zu beachten, dass bei diesem Vergleich keine Lebenszyklusemissionen berücksichtigt sind, sondern nur Emissionen während der Fahrt.



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

³⁰ Umweltbundesamt, 2020.

³¹ Umweltbundesamt, 2023.

Zusammenfassung

Neben CO₂-Emissionen spielen im Luftverkehr auch Nicht-CO₂-Klimaeffekte eine besondere Rolle. Zu diesen Effekten zählen die Bildung von Kondensstreifen-Zirren, die Wirkung von Stickoxidemissionen auf die Ozon- und Methankonzentration, die direkten und indirekten Aerosoleffekte sowie die Wasserdampfeffekte. Diese wirken in unterschiedlicher Weise auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre und unterscheiden sich deutlich in ihrer Verweildauer. Dadurch können sie nur mithilfe von Klimametrikern verglichen werden, die den direkten Zusammenhang zwischen der Emission und der zu betrachtenden Wirkung darstellen.

Bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung der Klimawirkung gilt es deshalb, die Wirkung aller klimarelevanten Luftverkehrsemissionen sowie ihre indirekten atmosphären-chemischen und mikrophysikalischen Effekte zusammen zu betrachten und ganzheitlich zu optimieren. Eine Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte auf Einzelflugbasis eröffnet dabei das Potential, durch optimierte Flugrouten die verursachte Klimawirkung signifikant zu reduzieren.

Auf technologischer Seite kann das energieeffiziente Flugzeug durch Widerstands- und Gewichtsreduktion, Kontrolle von Stabilität und Belastung, Optimierung der Bordsysteme, Integration neuer Vortriebstechnologien und benötigter Systeme für neue Kraftstoffe sowie neuartige Konfigurationen erreicht werden. Zusätzlich werden Triebwerkstechnologien erforscht, die auf eine Verringerung der Nicht-CO₂-Effekte abzielen. Neben der Verbesserung der Turboantriebe werden auch verteilte Antriebskonzepte, elektrische Komponenten, sowie Brennstoffzellen und hybridelektrische Antriebe erforscht.

Anstelle von konventionellem Kerosin können auch synthetische Kraftstoffe, die aus Biomasse oder mithilfe von Strom aus erneuerbarer Energie erzeugt werden, verwendet werden. Wird dabei nur die Menge an CO₂

7

ausgestoßen, die zuvor durch Pflanzenwachstum oder technische Verfahren aus der Atmosphäre entnommen wurde, werden diese CO₂ Emissionen als klimaneutral betrachtet. Werden zudem weniger Ruß- und Sulfatpartikel ausgestoßen, reduziert sich auch der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen.

Neben den technologischen Änderungen kann die Klimawirkung auch durch operationelle Maßnahmen reduziert werden. Dazu zählen sowohl die effizienzsteigernden Maßnahmen (direkteres Fliegen, höhere Auslastung) als auch eine klimaoptimierte Flugroutenführung, bei der Nicht-CO₂-Effekte, insbesondere Kondensstreifen, durch gezieltes Umfliegen klimasensitiver Regionen reduziert werden. Viele dieser operationellen Maßnahmen können nicht nur für zukünftige Flugzeugtypen, sondern auch für bestehende angewendet werden. Damit diese zeitnah eingeführt werden können, müssen internationale Rahmenbedingungen, vor allem in der Flugplanung und Flugsicherung, koordiniert angepasst werden.

Politische Maßnahmen können einen Anreiz schaffen, neue Technologien und operationelle Maßnahmen schneller zu entwickeln und umzusetzen und somit die Klimawirkung des Luftverkehrs zu reduzieren. Einzelne Personen können darüber hinaus Reiseentscheidungen bewusster treffen und die verbleibende Klimawirkung durch Kompensationszahlungen ausgleichen.

Somit gibt es insgesamt eine Reihe möglicher Maßnahmen zur Reduzierung der Klimawirkung des Luftverkehrs. Damit der Luftverkehr in Zukunft klimafreundlicher oder klimaneutral wird, müssen möglichst viele dieser Maßnahmen erforscht und zeitnah umgesetzt werden. Dies erfordert ein gemeinsames Vorgehen der Politik, sowie Vertretern aus Industrie, Wirtschaft, Forschung und Luftfahrtorganisationen und der Bevölkerung.

Literaturverzeichnis

- BDL (2018), Verbraucherumfrage 2018. URL: <https://www.bdl.aero/de/publikation/verbraucherumfrage/> [25.10.2022]
- BHL und LBST (2021): Power-to-Liquids – A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation. Background Paper, published by Umweltbundesamt, November 2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/background_paper_power-to-liquids_aviation_2022.pdf
- Dahlmann, K., Koch, A., Linke, F., Lührs, B., Grewe, V., Otten, T., Seider, D., Gollnick, V., Schumann, U. (2016). Climate-compatible air transport system – climate impact mitigation potential for actual and future aircraft. *Aerospace*, 3(4):38.
- Dahlmann, K., Matthes, S., Yamashita, H., Unterstrasser, S., Grewe, V., Marks, T. (2020), Assessing the climate impact of formation flights, *Aerospace* 7, 172, doi:10.3390/aerospace7120172
- DLR (2021) Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt: Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/04/20211215_auf-dem-weg-zu-einer-emissionsfreien-luftfahrt
- Europäische Kommission (2020) Updated analysis of the non-CO₂ climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to EU Emissions Trading System Directive Article 30(4), Full length report, Commission Staff Working Document, COM(2020) 747 final, Brussels, 23.11.2020
- Europäische Kommission (2021): Proposal for a COUNCIL DIRECTIVE restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity (recast). COM/2021/563 final <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0563>
- Europäische Kommission (2023): Pressemitteilung vom 26. April 2023. Europäischer Grüner Deal: Einigung über neue Richtlinie zur Senkung der Emissionen aus der Luftfahrt durch die Förderung nachhaltiger Flugkraftstoffe. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_2389
- Europäische Union (2023): Richtlinie (EU) 2023/958 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. Mai 2023 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG in Bezug auf den Beitrag des Luftverkehrs zum gesamtwirtschaftlichen Emissionsreduktionsziel der Union und die angemessene Umsetzung eines globalen markt-basierten Mechanismus <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32023L0958>
- Görtz, A. und Silberhorn, D. (2022) Thermodynamic Potential of Turbofan Engines with Direct Combustion of Hydrogen. ICAS 2022, 04. Sep.–09. Sep. 2022, Stockholm, Sweden
- IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- 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., De León, R.R., Lim, L.L., Lund, M.T., Millar, R.J., Owen, B., Penner, J.E., Pitari, G., Prather, M., Sausen, R., Wilcox, L.J. (2021) The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 *Atmospheric Environment*, Volume 244, 2021, 117834, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.
- Linke, F., Grewe, V., Gollnick, V., The Implications of Intermediate Stop Operations on Aviation Emissions and Climate (2017), *Met. Z.*, 697-709, doi:10.1127/metz/2017/0763.
- Lührs, B.; Niklaß, M.; Frömming, C.; Grewe, V.; Gollnick, V. (2016) Cost-Benefit Assessment of 2D- and 3D Climate and Weather Optimized Trajectories. 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), Washington, DC, June 13-17, 2016
- Marks, T., Dahlmann, K., Grewe, V., Gollnick, V., Linke, F., Matthes, S., Stumpf, E., Swaid, M., Unterstrasser, S., Yamashita, H., Zumege, C. (2021), Climate Impact Mitigation Potential of Formation Flight. *Aerospace* 8, 14, doi:10.3390/aerospace80100142021

Matthes, S., Lim, L. und Burkhardt, U. und Dahlmann, K. und Dietmüller, S. und Grewe, V. und Haslerud, A. S. und Hendricks, J. und Owen, B. und Pitari, G. und Righi, M. und Skowron, A. (2021) Mitigation of Non-CO₂ Aviation's Climate Impact by Changing Cruise Altitudes. *Aerospace*, 8 (36), Seiten 1-20. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/aerospace8020036

Niklaß, (2019) Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftfahrt. DLR-Forschungsbericht. DLR-FB-2019-6. Dissertation. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Righi, M., Hendricks, J. und Sausen, R.: The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol: simulations for year 2000 emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9939–9970, <https://doi.org/10.5194/acp-13-9939-2013>, 2013.

Righi, M., Hendricks, J., Beer, C. G. (2021) Exploring the uncertainties in the aviation soot–cirrus effect. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(23), 17267-17289.

Umweltbundesamt (2020), Umweltfreundlich mobil!
Ein ökologischer Verkehrsartenvergleich für den Personen- und Güterverkehr in Deutschland;
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_fb_umweltfreundlich_mobil_bf.pdf

Umweltbundesamt (2022), Der Europäische Emissionshandel;
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel>

Umweltbundesamt (2023): CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes
https://uba.co2-rechner.de/de_DE/footprint#panel-calc



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/