

Klimaneutralität in der Luftfahrt

– durch alternative Energieträger

Christopher Hecht, Thomas Hild und das Wasserstoff-Kompass-Team

Struktur des Dokuments

Hinweise zum Lesen des Dokuments

Vielfalt im Fokus

Nach einer kurzen Einleitung gibt dieses Dokument einen Überblick über die vergangene und prognostizierte Entwicklung des Flugverkehrs mit Fokus auf Deutschland und Europa. Diese Entwicklungen werden mit Pfaden zur Klimaneutralität kombiniert. Dabei werden verschiedene Energieträger, Unternehmen und Accounting-Systeme beleuchtet.

Verlinkungen

Im Dokument wird eine Fußzeile zur schnellen Navigation zwischen den Kapiteln bereitgestellt. Die Boxen verweisen auf die erste Seite des jeweiligen Kapitels.

Die Links in diesem Dokument führen stets zu externen Quellen oder weiterem Material, falls mehr Details benötigt werden.

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Internationaler Flugverkehr

Executive Summary



- Internationale Flugbewegungen werden von vielen CO₂-Minderungsprogrammen nicht erfasst. Das EU ETS erfasst nur innereuropäische Flüge. International nehmen 107 Länder an CORSIA teil, bei dem Emissionen im Luftverkehr durch andere Maßnahmen ausgeglichen werden.
- Nicht-CO₂-Effekte wie Wolkenbildung insb. durch Rußpartikel und freigesetzte NO_x interagieren stark mit dem Klima und erhöhen die Klimawirksamkeit auf das Dreifache relativ zu den reinen CO₂-Emissionen.

Trends

Prognosen

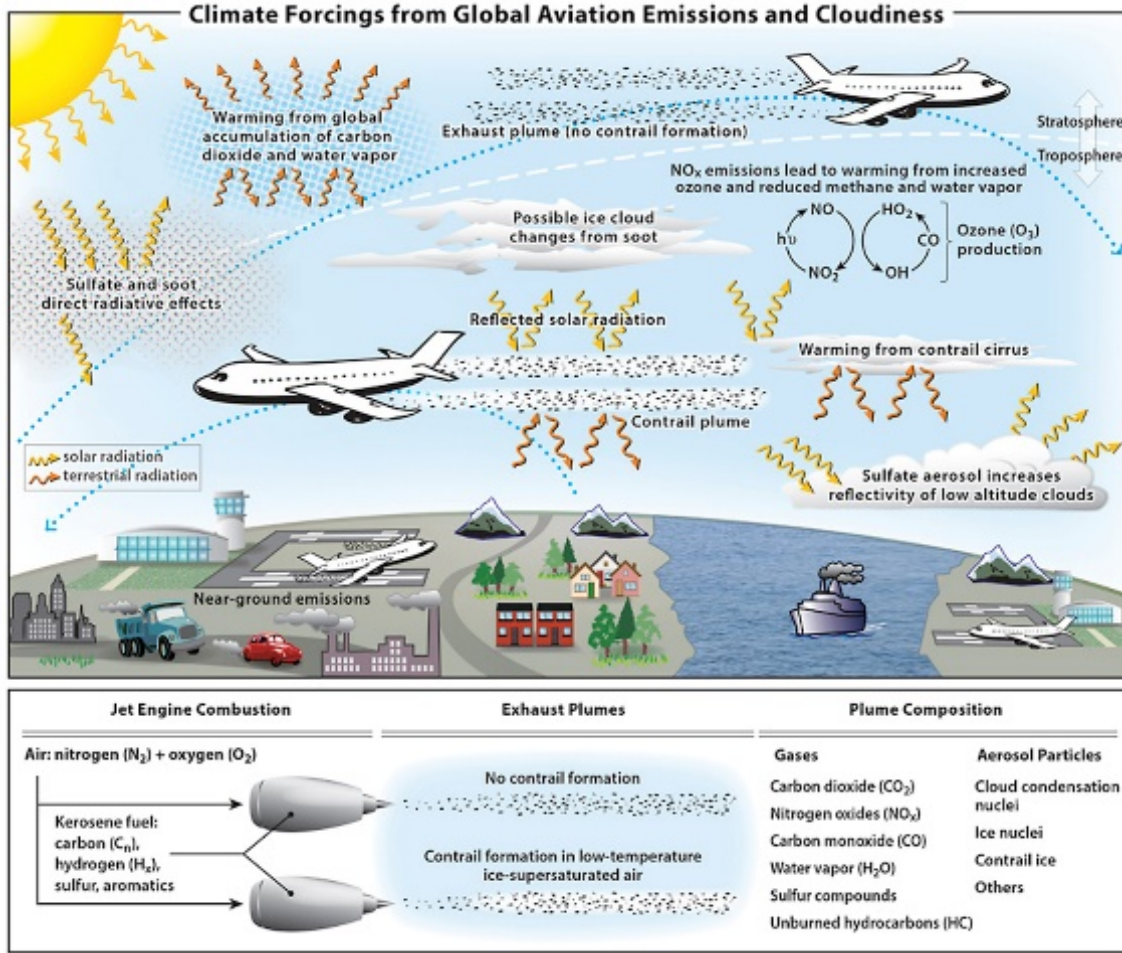
Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Einleitung



- Die Luftfahrt trug bisher etwa 3,5%¹ zur Klimaerwärmung bei, obwohl sie nur ca. 2%² der bisherigen CO₂-Emissionen erzeugte. Grund hierfür sind v.a. die Nicht-CO₂-Effekte, NOX-Emissionen und Kondensstreifen-Zirren.
- Klimaneutralität ist herausfordernd, da Energie kompakt und sicher gespeichert werden muss. Wegen der Nicht-CO₂-Effekte erreicht CO₂-neutrales Kerosin allein keine Klimaneutralität.

1: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2020/03/20200903_der-globale-luftverkehr-traegt-3-5-prozent-zur-klimaerwaermung-bei.html, Andere Quellen nennen andere Zahlen, v.a. aufgrund des nicht eindeutig quantifizierbaren Effekts von Kondensstreifen ;
2: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834> ; Bildquelle: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>

Trends

Prognosen

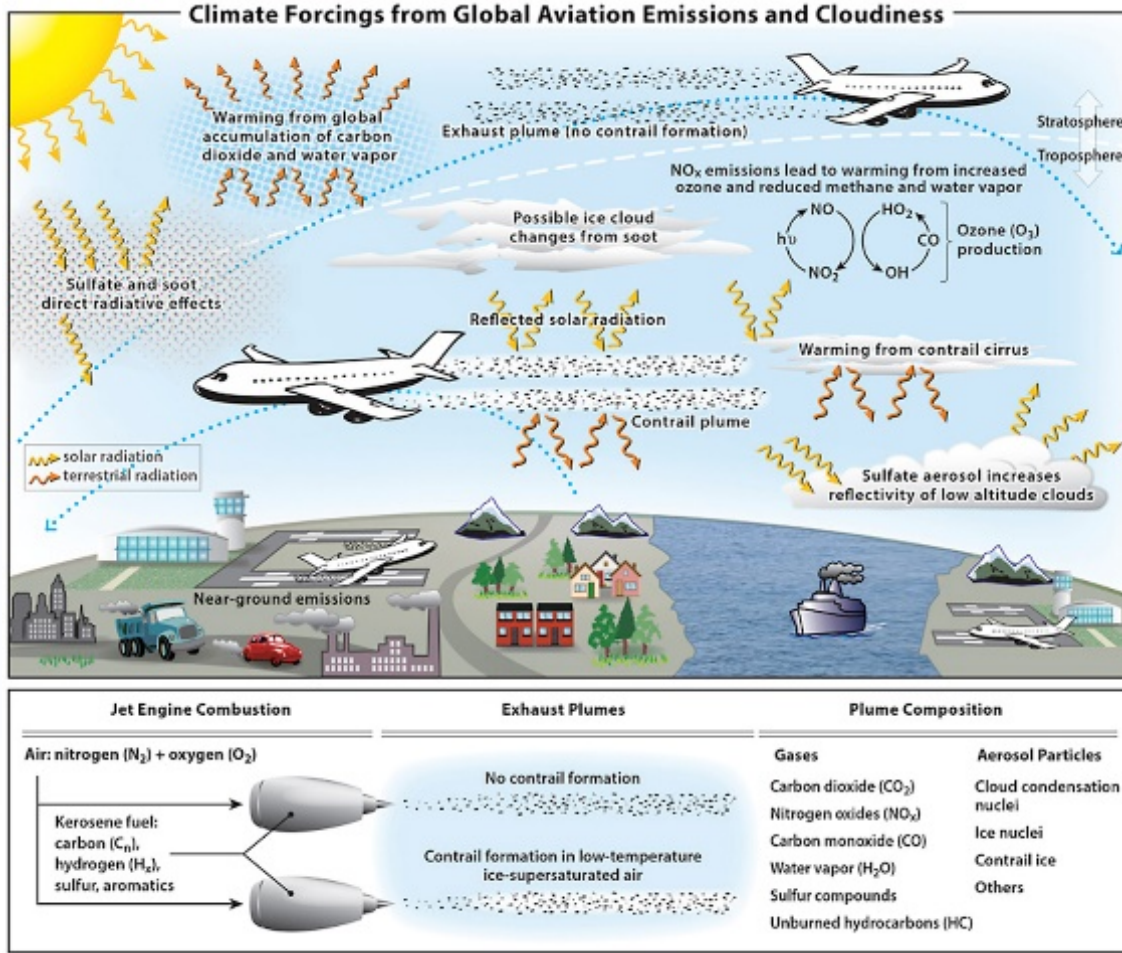
Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Einleitung



- Die EU setzt auf biogene und synthetische Kraftstoffe.
- Vorhersagen zur weltweiten Verkehrsleistung gehen vom Erreichen des vor-Corona-Niveaus Mitte der 2020er aus und erwarten danach weitere Steigerungen der Flugkilometer.

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Agenda

Aktuelle Trends

Prognosen

Klimawirkung und Vermeidungsstrategien

Rolle verschiedener Energieträger

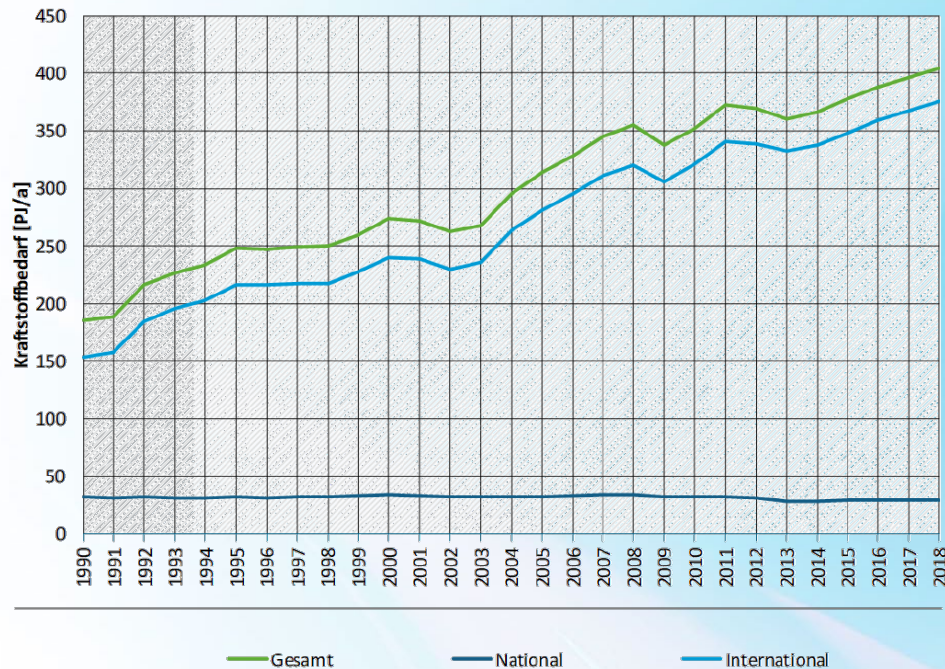
Unternehmen

Accounting-Systeme

Aktuelle Trends

Kraftstoffverbrauch

Kraftstoffverbrauch aller von deutschen Flughäfen abgehender Flüge¹



- Der Kraftstoffbedarf hat sich seit 1990 mehr als verdoppelt. Treibender Faktor ist der internationale Verkehr.
- 99.4% des Kraftstoffbedarfs werden durch Kerosin gedeckt¹.
- Das Tremod-Modell erwartet zukünftig einen konstanten Energieverbrauch¹. Die meisten anderen Studien prognostizieren einen steigenden Bedarf.
- Bei 38% - 63%² Effizienz wäre der Strombedarf zur Herstellung der Kraftstoffe in 2018 durch Power-to-Liquid bei ~635 - 1050 PJ (176 - 292 TWh).

1: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf;

2: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/161005_uba_hintergrund_ptl_barrierefrei.pdf

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

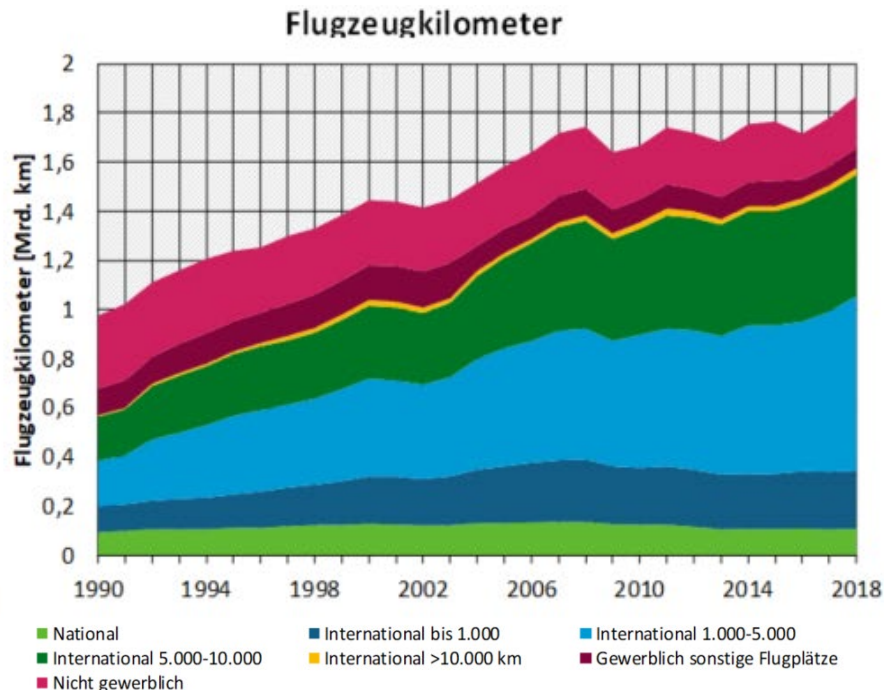
Unternehmen

Accounting

Aktuelle Trends

Verkehrsleistung

Flugzeugkilometer aller von deutschen Flughäfen abgehender Flüge¹



- Die Verkehrsleistung bzw. Flugzeugkilometer nehmen kontinuierlich zu. Die Corona-Pandemie hat die Verkehrsleistung (temporär) vermindert.
- Treiber hierfür sind internationale Personenflüge auf einer Distanz von 1.000 – 10.000 km sowie internationale Frachtflüge zwischen 5.000 und 10.000 km. Nationaler Flugverkehr spielt eine untergeordnete Rolle.
- Aufgrund dieser Entwicklungen nimmt der Anteil der Start- und Landephase am Gesamtenergiebedarf leicht ab (1990: ca. 12%; 2018: 9,5%).

1: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

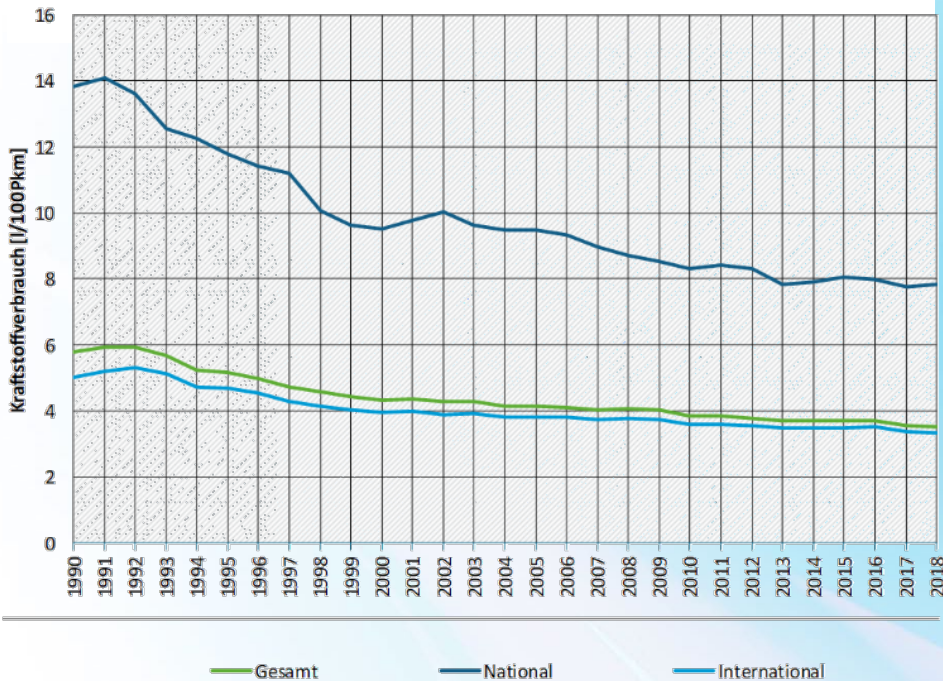
Unternehmen

Accounting

Aktuelle Trends

Energieeffizienz

Kraftstoffverbrauch aller von deutschen Flughäfen abgehender Flüge¹



- Der spezifische Kraftstoffverbrauch pro Personenkilometer hat über die letzten 30 Jahre um 33% im internationalen und um 43% im nationalen Verkehr abgenommen.
- Die Verbesserung ergibt sich aus verbesserter Auslastung sowie effizienteren und größeren Flugzeugen. Auch gilt: Bei längerer Flugdistanz fallen die kraftstoffintensiven Starts und Landungen weniger ins Gewicht.
- Nationaler Flugverkehr erzeugt einen deutlich höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch, da der Anteil der Start- und Landephase höher ist und z.T. Flugzeuge kleiner und ineffizienter sind.

1: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Agenda

Aktuelle Trends

Prognosen

Klimawirkung und Vermeidungsstrategien

Rolle verschiedener Energieträger

Unternehmen

Accounting-Systeme

Prognosen

Ein Vorwort

Die Luftfahrt hat in den **vergangenen Jahrzehnten ein enormes Wachstum** hingelegt und mit z.T. einstelligen Ticketpreisen immer neue Kundengruppen angesprochen. Basierend auf diesen Trends wurden ebenfalls stark optimistische Annahmen getroffen, was zukünftige Entwicklungen angeht.

Durch die aktuellen Entwicklungen (Corona-Pandemie, verstärktes Klimabewusstsein, bessere Schnellzugnetze, mehr Remote-Treffen, gestiegene Energiepreise, u.v.m.) erscheint zumindest **mittelfristig eine Reduktion des Wachstums** vom niedrigeren post-

pandemischen Startpunkt aus wahrscheinlich.

Inwieweit die fundamentalen prä-pandemischen Wachstumskräfte wie steigendes BIP pro Kopf und höhere Kosteneffizienz in der Luftfahrt die bremsenden Kräfte kompensieren können, ist aktuell nur schwer abzuschätzen. Daher sind **sämtliche Prognosen aktuell mit großer Unsicherheit** behaftet, die zumindest bis zur Überwindung der Corona-Pandemie und Beendigung des Angriffskriegs in der Ukraine bestehen bleiben werden.

Prognosen

Verkehrsleistung

Jährliche Wachstumsraten verschiedener großer Studien

Studie	Datum	Einheit	Welt	EU	DE
IATA passenger forecast	2021	PAX (Flug-gäste)	3,2%	2,0%	n.a.
	2020		3,7%	2,2%	
Boeing commercial market outlook	2021	RPK ¹ (Passa-gier-km)	4,0%	3,1%	n.a.
	2019		4,6%	3,6%	
Airbus global market forecast	2021	RPK ¹ (Passa-gier-km)	3,9%	2,2%	n.a.
	2019		4,3%	3,3%	
Eurocontrol 2050 (base scenario) Eurocontrol 2040	2022	Anzahl Flüge	n.a.	1,2% ²	0,8%
	2018			1,9%	1,6%

- Durch Corona hat sich das jährliche Wachstum in den Studien stark reduziert, auch wenn die meisten den Russland-Ukraine-Krieg noch nicht berücksichtigen.
- Für Europa wird eine Rückkehr zum 2019er Niveau im Jahr 2024 geschätzt³.
- Globale Wachstumsmärkte sind vor allem China, die USA und Langstreckenflüge (auch von/nach Europa).
- Große Unsicherheit: Prognosen verschieben sich stark.
- Flugzeughersteller sind optimistisch, allerdings besteht hier auch ein starkes Eigeninteresse.

1: Revenue Passenger Kilometers

2: Anzahl Flüge: 1,2% und RPK: 1,6%

3: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2021-2027>

; <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>

Trends

Prognosen

Klimawirkung

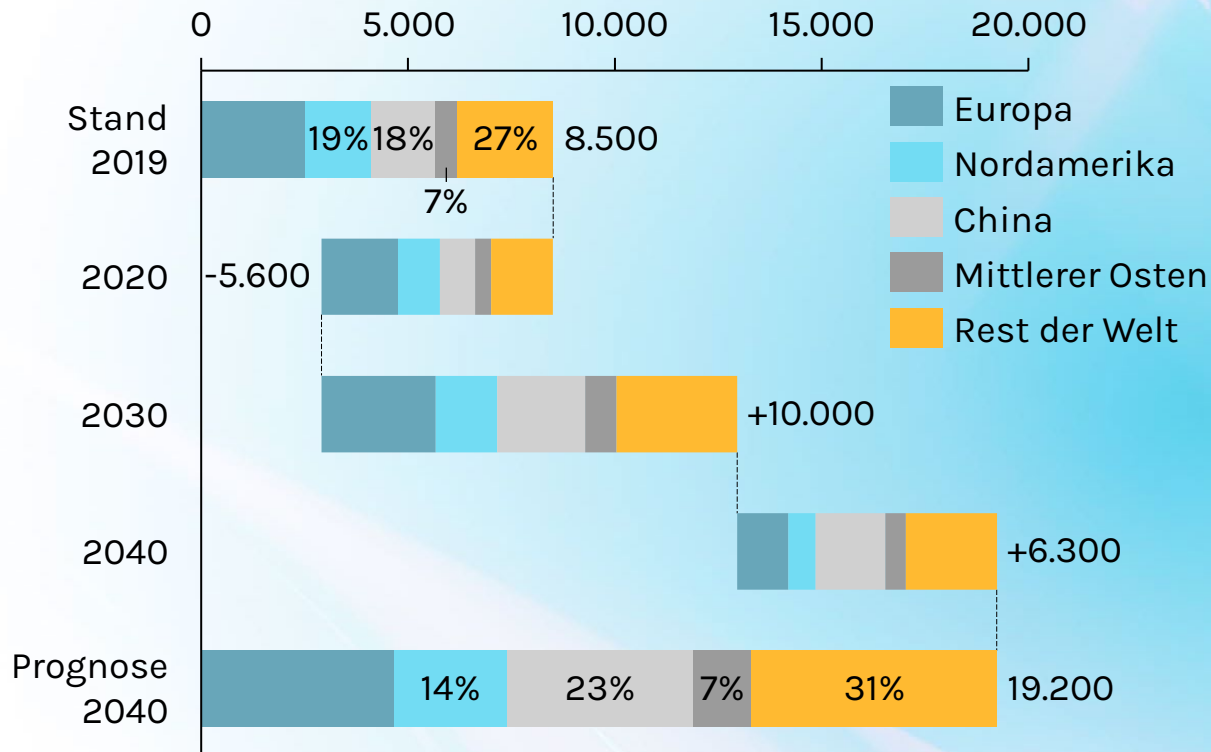
Energieträger

Unternehmen

Accounting

Prognosen

Entwicklung der Verkehrsleistung
in Mrd. Personenkilometer nach Abflugsregion¹



- Global sind Europa und Nordamerika mit 30% und 19% der weltweiten Personenkilometer die größten Luftfahrtmärkte. Bis 2040 wird sich dieser Wert nach Schätzung von Boeing auf 24% und 14% reduzieren.
- Der höchste Zuwachs ist mit 2960 Mrd. Personenkilometer in China zu erwarten. In absoluten Zahlen ist das Wachstum in Europa (2145 Mrd. Personenkilometer) und Nordamerika (1134 Mrd. Personenkilometer) ebenfalls hoch. Das relative Wachstum ist insbesondere im Rest von Süd- und Ostasien sowie in Afrika besonders hoch.

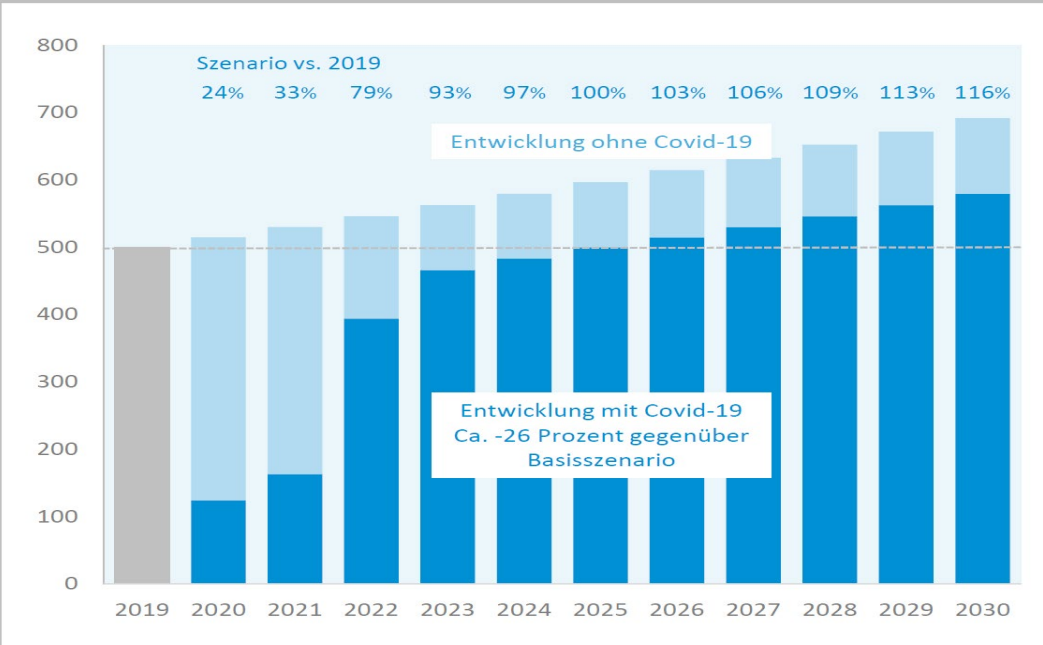
1: https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/market/assets/downloads/CMO%202021%20Report_13Sept21.pdf#page=19

Prognosen

Verkehrsleistung von deutschen Flughäfen

Flugzeugkilometer aller von deutschen Flughäfen abgehender Passagierflüge nach BDL (08.2021)¹

Szenario der Luftverkehrsentwicklung im Passagierverkehr in und mit Deutschland (gemessen in Mrd. Passagierkilometern)



- Der Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) rechnet erst 2025 mit einem Erreichen der Verkehrsleistung von 2019.
- Ab 2022 wird eine starke Erholung gegenüber den Corona-Jahren 2020 und '21 erwartet.
- Der BDL erwartet ab 2025 für Deutschland mit ca. 3%/a ein deutlich höheres Wachstum als vergleichbare Studien dies tun ([Link zur Folie](#)) und liegt damit näher an Wachstumserwartungen von vor der Pandemie.

1: https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2021/08/20210810_Halbjahreszahlen-2021-1.pdf
2: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_fb_wohin-geht-die-reise.pdf

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

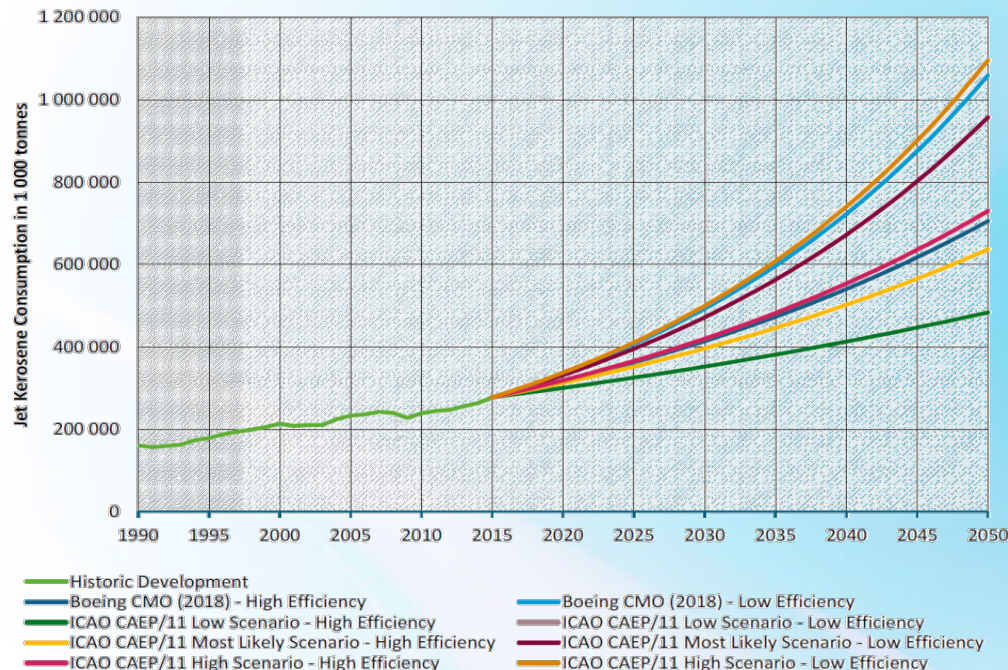
Unternehmen

Accounting

Prognosen

Globaler Kerosinverbrauch

Prognosen des weltweiten Kerosinbedarfs in 1000 t bis 2050 (prä-Covid)¹



Quelle: (Cames et al., 2019)

- Aufgrund unterschiedlicher Annahmen zum jährlichen Wachstum gehen die Prognosen zum Kerosinbedarf weit auseinander.
- Der prognostizierte Anstieg der Verkehrsleistung kann durch Effizienzsteigerungen der Flugzeugflotten nicht kompensiert werden.
- Global ist der Kerosinverbrauch von 161 Mio. t (1990) auf 278 Mio. t (2015) angestiegen (International Energy Agency).
- Die prognostizierten Werte spiegeln noch nicht die Rückgänge durch die Corona-Pandemie und den Russland-Ukraine-Krieg wider.

1: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06_texte-130-2019_umweltschonender_luftverkehr_0.pdf

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Agenda

Aktuelle Trends

Prognosen

Klimawirkung und Vermeidungsstrategien

Rolle verschiedener Energieträger

Unternehmen

Accounting-Systeme

Effekte weiterer Emissionen des Flugverkehrs (1/4)

Effektiver Strahlungsantrieb (ERF) der gesamten Flugzeugemissionen in 2018 in Tg CO ₂ (-Äquivalenten) ¹							
ERF-Term	GWP ₂₀	GWP ₅₀	GWP ₁₀₀	GTP ₂₀	GTP ₅₀	GTP ₁₀₀	GWP* ₁₀₀
CO ₂	1034	1034	1034	1034	1034	1034	1034
Kondensstreifen- Zirren (nach T _{gCO2}) ²	2399	1129	652	695	109	90	1834
Net NO _x	887	293	163	-318	-99	19	339
Aerosole							
Rußemissionen	40	19	11	12	2	2	20
SO ₂ -Emissions	-310	-146	-84	-90	-14	-12	-158
Wasserdampf	83	39	23	27	4	3	42
Total CO ₂ -eq (nach km) ³	4128	2366	1797	1358	1035	1135	3111
Total CO ₂ -eq/CO ₂	4	2,3	1,7	1,3	1	1,1	3

- Durch die hohe Flughöhe wirken auch andere Effekte auf die Atmosphäre.
- Global Warming Potential (GWP, [Details](#)) beschreibt, wie viel Energie/Wärme aufgenommen wird.
- Global Temperature change Potential (GTP, [Details](#)) beschreibt, wie stark die Temperatur verändert wird.
- Die Verweildauer in der Atmosphäre ist je nach Molekül unterschiedlich, weswegen GWP und GTP für verschiedene Zeiträume angegeben werden.
- Letzte Zeile: das Verhältnis der gesamten Wirkung der Luftfahrt relativ zur Wirkung des CO₂ alleine.

1: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834> ;

2: Gezeigt ist die Wirkung relativ zum CO₂, was durch Flugzeuge in dem Jahr ausgestoßen wurde

Effekte weiterer Emissionen des Flugverkehrs (2/4)

Effektiver Strahlungsantrieb (ERF) der gesamten Flugzeugemissionen in 2018 in Tg CO₂-Äquivalenten)¹

ERF-Term	GWP ₂₀	GWP ₅₀	GWP ₁₀₀	GTP ₂₀	GTP ₅₀	GTP ₁₀₀	GWP* ₁₀₀
CO ₂	1034	1034	1034	1034	1034	1034	1034
Kondensstreifen-Zirren (nach Tg _{CO2}) ²	2399	1129	652	695	109	90	1834
Net NO _x	887	293	163	-318	-99	19	339
Aerosole							
Rußemissionen	40	19	11	12	2	2	20
SO ₂ -Emissionen	-310	-146	-84	-90	-14	-12	-158
Wasserdampf	83	39	23	27	4	3	42
Total CO ₂ -Äq (nach km) ³	4128	2366	1797	1358	1035	1135	3111
Total CO ₂ -Äq/CO ₂	4	2.3	1.7	1.3	1	1.1	3

Beispielhafte Erläuterung der **markierten** Spalte:

- Es wurden $1034 \cdot 10^6$ t CO₂ ausgestoßen
- Die Kondensstreifen-Zirren tragen mit $1834 \cdot 10^6$ t CO₂-Äquivalenten noch einmal die 1,8-fache Klimawirkung zusätzlich bei.
- Andere Emissionen haben z.T. wärmende oder kühlende Wirkung.
- In Summe wird die Wirkung auf das GWP₁₀₀ nach Lee et al.¹ auf $3111 \cdot 10^6$ t CO₂ Äquivalenten geschätzt (Faktor ~3 vs CO₂).

1: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834> ; 2: Gezeigt ist die Wirkung relativ zum CO₂, was durch Flugzeuge in dem Jahr ausgestoßen wurde

Klimawirkung

Effekte weiterer Emissionen des Flugverkehrs (3/4)



- Lee et al.¹ schätzen, dass die CO₂-Emissionen nur etwa 1/3 des gesamten luftfahrtbedingten GWP über die nächsten 100 Jahre ausmachen. Wie die vorangegangenen Folien gezeigt haben, bestehen hier jedoch große Unsicherheiten.
- Aufgrund der Mengenverhältnisse sind die treibenden Kräfte dabei die Eis-Wolkenbildung (Zirren) an Kondensstreifen und NO_x-Emissionen. Zirren halten nachts Wärmestrahlung der Erde zurück und verhindern so eine Abkühlung. Tagsüber wirken sie kühlend. NO_x-Emissionen begünstigen u.a. die Entstehung von Ozon, was als Treibhausgas wirkt.

1: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834> ; 2: <https://www.nature.com/articles/s43247-021-00174-y>

Klimawirkung

Effekte weiterer Emissionen des Flugverkehrs (4/4)



- Neben den langfristigen Effekten durch CO₂ und NO_x wirkt Flugverkehr vor allem auf einem kurzen Zeithorizont, da die Klimawirksamkeit der erzeugten Wolken zwar stark ist, diese aber nur wenige Stunden bestehen.
- Neue Forschungsergebnisse² legen nahe, dass synthetische Kraftstoffe mit geringerem Anteil an Aromaten weniger Ruß emittieren. Da sich die Eiskristalle in Kondensstreifen an Rußpartikeln formen, ist eine geringere Klimawirkung bei weniger Eiskristallen naheliegend. Ursächlich hierfür ist, dass Ruß primär aus nicht oxidiertem Kohlenstoff besteht und die Verbrennung bei ringförmigen Aromaten häufiger unvollständig ist.

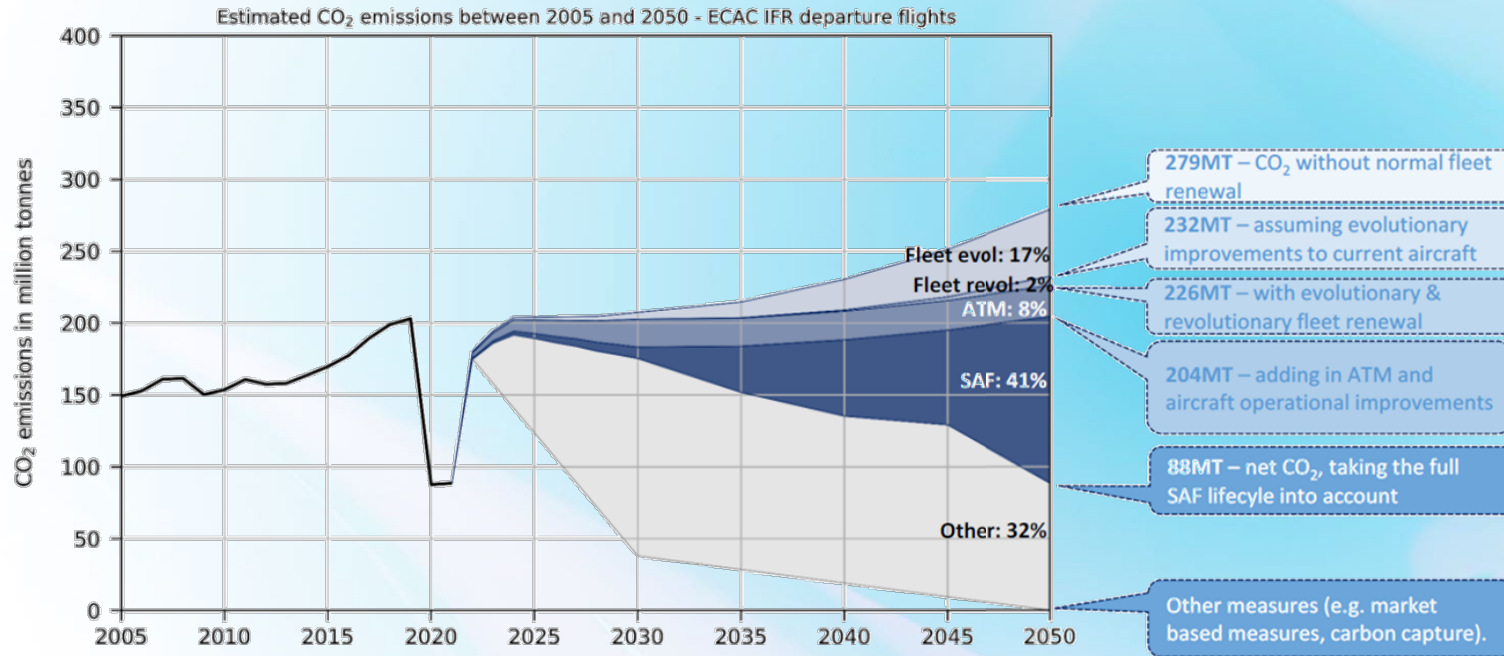
1: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834> ; 2: <https://www.nature.com/articles/s43247-021-00174-y>

Klimawirkung

Pfade zur Erreichung der Nachhaltigkeit (1/3)

Dekarbonisierungsroadmap
von Eurocontrol¹

EAO 2050 - Base scenario



Die Grafik zeigt ein prognostiziertes Szenario „Business as Usual“ (obere Linie). Durch Maßnahmen (jeweils ein Balken) wie Flugzeugverbesserungen, [Air traffic management](#) (ATM), Sustainable Aviation Fuels (SAFs) etc. werden Emissionen vermieden. Durch Kombination der Maßnahmen soll CO₂-neutrales Fliegen in 2050 möglich werden.

¹ <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-aviation-outlook-2050>

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

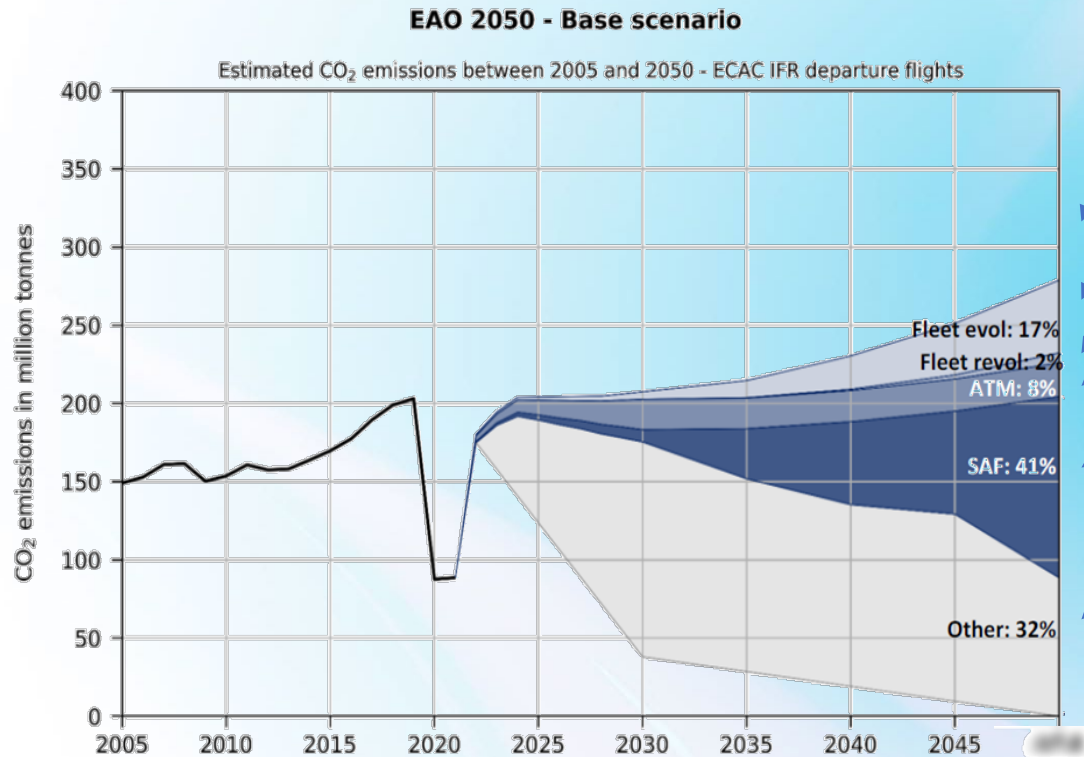
Unternehmen

Accounting

Klimawirkung

Pfade zur Erreichung der Nachhaltigkeit (2/3)

Dekarbonisierungsroadmap von Eurocontrol
für in Europa startende Flüge¹



- Das vorgesehene Wachstum des Flugverkehrs würde mit den heutigen Technologien und Gewohnheiten im Jahr 2050 zu **279 Mt CO₂-Emissionen** führen.
- Durch die **normale Entwicklung** von Technologien können 17% dieser Emissionen vermieden werden.
- Der Einsatz von **revolutionären Flugzeugen**, wie z.B. H₂-Antrieb, wird für 2050 noch sehr gering geschätzt, so dass nur 2% der Emissionsreduktion davon gesteuert wird.
- Die **Flug- und Fahrbetriebsverbesserung** ist kurzfristig eine Low Hanging Fruit für die Emissionsreduktion, aber langfristig bleibt ihr Beitrag gering.
- Demzufolge kommt im Jahr 2050 die Emissionsreduktion primär aus **nachhaltigen Kraftstoffen (SAF)**.
- Um die Klimaziele bis 2030 im Flugverkehr zu erreichen, hält Eurocontrol **ökonomische Maßnahmen** analog zum EU ETS, sowie eine Kompensation über **Kohlenstoffabspaltung** von CO₂-Emissionen Dritter für notwendig.

¹ <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-aviation-outlook-2050>

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

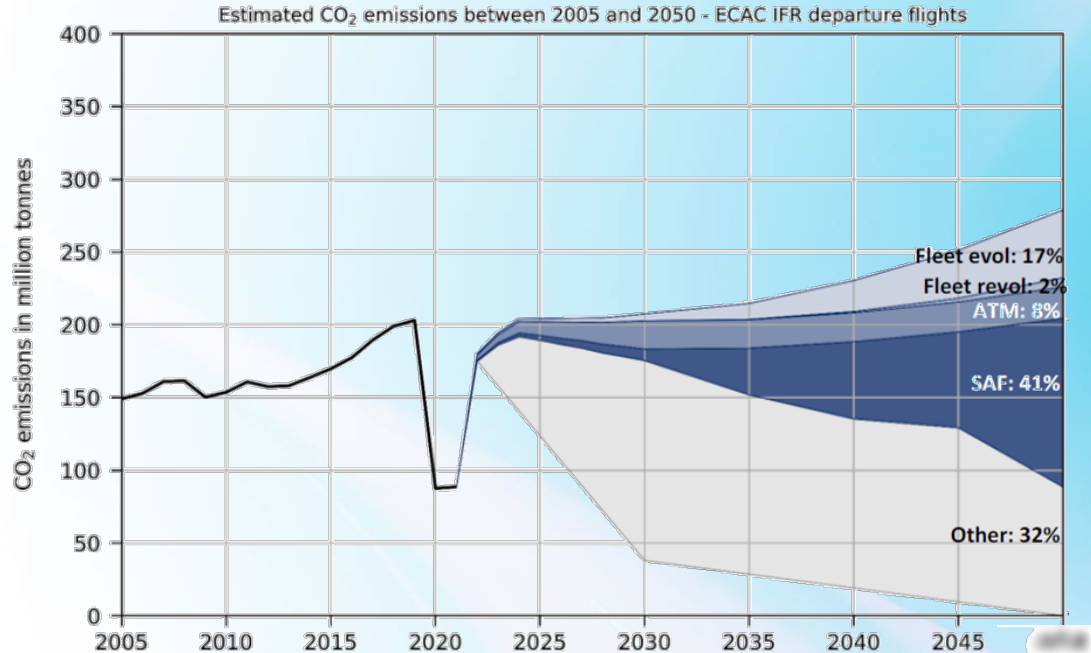
Accounting

Klimawirkung

Pfade zur Erreichung der Nachhaltigkeit (3/3)

Dekarbonisierungsroadmap von Eurocontrol¹

EAO 2050 - Base scenario



- Der Einsatz von alternativen Flugzeugen (z.B. mit H₂-Antrieb) wird für 2050 gering geschätzt, weswegen auch die Klimaschutzwirkung gering ist. Dies liegt vermutlich daran, dass die meisten Personen- und Frachtkilometer auf langen Flugstrecken entstehen, d.h. ein Ersetzen von kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen hier schwer ist.
- Der Block "Other", welcher primär ökonomische Maßnahmen und Kompensation enthält, ist in der Umsetzung besonders komplex.
- Klimaneutrales Wachstum des Flugverkehrs scheint möglich, aber sehr herausfordernd.

¹ <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-aviation-outlook-2050>

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Agenda

Aktuelle Trends

Prognosen

Klimawirkung und Vermeidungsstrategien

Rolle verschiedener Energieträger

Unternehmen

Accounting-Systeme

Energieträger

Einführung



- Flugzeuge haben hohe Anforderungen an Energiedichte und Sicherheit mit zugleich sehr diversem Anwendungsprofil.
- Auf kurzen Strecken scheint batterieelektrisches Fliegen durchaus möglich (Stichwort Flugtaxi), aber auf längeren Strecken wird die notwendige Energiedichte auch perspektivisch chemische Kraftstoffe erfordern.
- In diesem Kapitel werden zunächst zentrale Optionen vorgestellt. Danach werden notwendige Mengen an e-Fuels und dafür notwendigem Wasserstoff abgeschätzt.

Rolle des Wasserstoffs

- Relativ zu Kerosin verfügt flüssiger Wasserstoff über eine hohe gravimetrische, aber niedrige volumetrische Energiedichte.
- 1.000 km Reichweite wurden bereits demonstriert und mehrere tausend angekündigt, aber noch nicht realisiert¹.
- Innereuropäische Flüge sind nach Schätzung des EU FCHJU ab 2035 möglich².
- Es entstehen vermutlich mehr NO_x-Emissionen und größere Wassertröpfchen als bei Kerosin. Letztere haben aber eine stark kürzere Lebensdauer.

1: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_hydrogen_the_future_fuel_for_aviation.pdf

2: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/quiet-and-green-why-hydrogen-planes-could-be-future-aviation>

Rolle der Direktelektrifizierung

- Die niedrige Energiedichte macht eine vollständige Direktelektrifizierung nur für kurze Strecken attraktiv.
- Hybridsysteme können unterstützen, wenn Zonen mit starker Kondensstreifenbildung elektrisch durchflogen werden sollen, Lärmemissionen beim Start vermieden werden sollen oder die Triebwerksleistung auf Reiseflug und nicht Steigflug optimiert werden soll.

Energieträger

- Neben Wasserstoff oder synthetischem Kerosin sind weitere chemische Energieträger denkbar. Ein grober Vergleich der Optionen ist in untenstehender Tabelle aufgezeigt (1=schlecht, 5=gut).
- Kein Kraftstoff ist in allen Bereichen die beste Wahl. Die niedrige Energiedichte und hohen strukturellen Herausforderungen von kohlenstofffreien Kraftstoffen sind aber problematisch.

Eigenschaften	Jet A-1	nC8H18	Methanol	Methan	Wasserst.	Ammoniak	NH3/H2
CO ₂ -Emissionen	1	4	4	4	5	5	5
Elektrische Synthetisierbarkeit	-	3	3	4	5	5	5
Spezifische Energie	4	4	2	4	5	2	2
Energiedichte	5	5	2	3	1	2	2
Speicherbarkeit	5	5	4	2	1	3	3
Toxizität	3	3	2	4	5	1	1
Verbrennungseigenschaften	5	5	4	5	5	2	5
NO _x und weitere Rußemissionen	2	2	4	4	4	3	4
Drop-In-Fähigkeit (Verbrennung)	5	4	2	2	2	2	4
Turbinenleistung	4	4	4	4	5	5	5
Drop-In-Fähigkeit (Turbine)	5	5	4	3	2	2	3
Mechanischer Stress	4	4	3	3	2	2	3

Quelle der Tabelle: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/392>

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

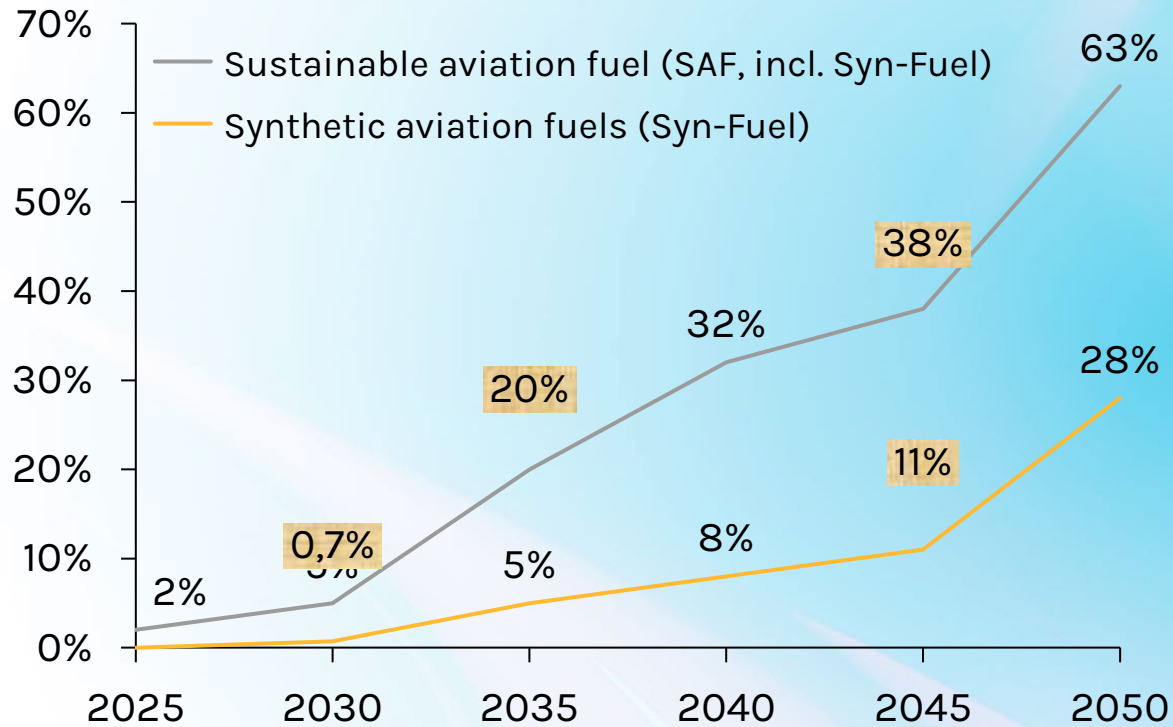
Unternehmen

Accounting

Energieträger

Anteil nachhaltiger Treibstoffe nach EU-Regeln

Von der EU vorgeschriebene Anteile nachhaltiger und synthetischer Kraftstoffe für Flugzeuge nach Jahren¹



- Die EU plant eine Quote, nach der ab 2025 nachhaltige Treibstoffe zu Flugkerosin beigemischt werden müssen¹.
- Dieser Treibstoff darf aus biogenen Quellen stammen, sofern keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion entsteht. Dies wird über die Auswahl der biologischen Ausgangsstoffe gewährleistet².
- Ein Mindestanteil synthetischer Treibstoffe ist auch vorgegeben. Dieser liegt aber erst ab 2035 in nennenswerter Höhe.
- Wasserstoff gilt als synthetischer Treibstoff und bildet die Basis für weitere synthetische Treibstoffe.

1: Regulation for sustainable air transport, 2021/0205 (COD):

https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueeu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf

2: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001> (Annex IX)

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

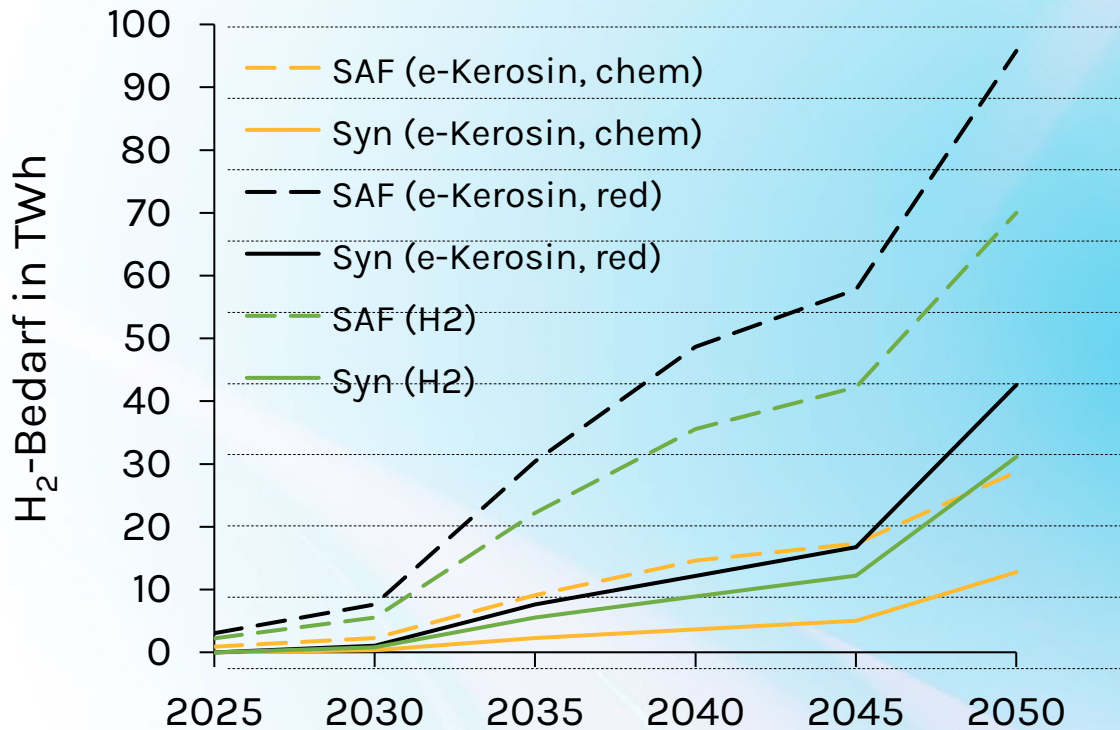
Unternehmen

Accounting

Energieträger

Bedarf an Wasserstoff in e-Fuels

Von der EU vorgeschriebene Anteile nachhaltiger und synthetischer Kraftstoffe für Flugzeuge nach Jahren¹



- Synthetische Kraftstoffe enthalten pro kg ~0,15 kg H₂. Wird Kohlenstoff aus CO₂ gewonnen, werden zusätzlich ~0,35¹ kg H₂ zur Reduktion des CO₂ benötigt.
- Aufgrund hoher Unsicherheit bzgl. zukünftiger Bedarfe basiert die folgende Rechnung auf dem **deutschen Bedarf in 2018 (400 PJ / 111 TWh)**.
- Gezeigt ist der H₂-Bedarf bei Anwendung der [RED II](#), wenn alle SAFs² oder nur die synthetischen Kraftstoffe („Syn“) e-Kerosin oder H₂ sind. „chem“ zeigt den anteiligen H₂-Bedarf, welcher chemisch in Kerosin gebunden ist. Bei „red“ wird der H₂ zur CO₂-Reduktion hinzugerechnet.

1: Bei diesem Wert herrscht eine gewisse Unsicherheit und je nach Prozess wären auch geringere Mengen von z.B. 0,29 kg H₂ möglich (siehe Gesamtmenge von 0,44 kg H₂ für Reduktion und Wasserstoff im Treibstoff <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-ALL-REP-0004-FlyZero-Our-Vision-for-Zero-Carbon-Emission-Air-Travel.pdf#page=16>) ; 2: SAFs schließen auch Kraftstoffe biologischen Ursprungs mit ein

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Agenda

Aktuelle Trends

Prognosen




Klimawirkung und Vermeidungsstrategien

Rolle verschiedener Energieträger

Unternehmen

Accounting-Systeme

Große Flugzeughersteller im Bereich Wasserstoff

Hersteller	Geplante Flugzeuge	
	<p>Airbus plant drei Flugzeuge im Rahmen der ZEROe Reihe mit 3.700 km Reichweite bis 2035</p>	<ul style="list-style-type: none">• Von Airbus und Boeing positioniert sich nur Airbus klar pro Wasserstoff. Boeing ist skeptisch bezüglich Energiedichte und Flamm- und Explosionsrisiko.
	<p>Boeing ist bezüglich Wasserstoff skeptischer und setzt auf andere Treibstoffe zur Erreichung der Klimaziele.</p>	<ul style="list-style-type: none">• Beide Hersteller arbeiten an H₂-Flugzeugen und haben bereits Demonstratoren gezeigt. Airbus will z.B. einen A380 mit Wasserstoff testen. Boeing nutzt Wasserstoff eher im Bereich Raumfahrt.
	<p>Comac (staatl. Flugzeugbauer in China) nennt kein Startdatum für Wasserstoff-Flugzeuge.</p>	<ul style="list-style-type: none">• Comac ist nicht etabliert, wird aber stark vom chinesischen Staat unterstützt. Im Bereich Wasserstoff ist der technische Vorsprung der anderen weniger hoch, weswegen ein Aufholen möglich erscheint.

Unternehmen

Start-Up-Flugzeughersteller im Bereich Wasserstoff

Start-Up



Geplante Flugzeuge

Flugzeug mit 550 km Reichweite und 19 Sitzen für 2024 geplant

H2FLY

Konvertierte Dornier 328 soll 2025 für Testflüge bereitstehen



Bietet Betankungsinfrastruktur und 2 umgerüstete Flugzeuge an



Ein Kleinflugzeug ("i-2") soll 2025 kommerzialisiert werden

- Die links gezeigten Firmen planen, wasserstoffbetriebene Flugzeuge anzubieten (Aufflistung ohne Anspruch auf Vollständigkeit).
- Generell sind erste Tests oder kleinskaliger kommerzieller Betrieb für ~2025 geplant.
- Erste größere Flugzeuge sind für den Zeitraum 2030 bis 2040 geplant, allerdings sind Pläne noch in der Konzeptphase.
- Insgesamt zeigt sich, dass selbst in optimistischen Szenarien kein signifikanter Bedarf an reinem Wasserstoff in den 2030ern zu erwarten ist.

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Unternehmen

Die drei größten Triebwerkhersteller

Hersteller



Geplante Triebwerkmodifikationen

“By 2023, all our Business Aviation aero engine types will be proven compatible with 100% SAF [Sustainable Aviation Fuel]”

“All Pratt & Whitney engines are compatible with [50% SAF](#)”

“All GE Aviation engines can operate today on [approved SAF](#)”

H₂ Demo-Projekte

Keine Demo-Projekte gelistet. Als Handlung zur Klimaneutralität wird “[Exploring the application of hydrogen in aviation recognising its potential opportunity as an alternative fuel](#)” genannt.

[Pratt & Whitney Awarded by DOE to develop Hydrogen Propulsion Technology](#), 02/2022

Projekt basierend auf Verbrennungsmaschine <https://youtu.be/J0tU07jswdI>

→ Keiner bekennt sich zu einem H₂-Einführungsszenario

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Agenda

Aktuelle Trends

Prognosen

Klimawirkung und Vermeidungsstrategien

Rolle verschiedener Energieträger

Unternehmen

Accounting-Systeme

Internationaler Flugverkehr

	Book and Claim	Emission Trading	Physische Lieferung	Kompensation
Def.	Grüne Eigenschaft des Kerosins wird unabhängig von physischer Lieferung gehandelt.	Fluggesellschaften erhalten/kaufen ein CO ₂ -Budget, was auch gehandelt werden kann.	SAFs können nur angerechnet werden, wenn sie in dem entsprechenden Flug verwendet werden.	CO ₂ -Emissionen werden durch CO ₂ -negative Maßnahmen wie Aufforstung kompensiert
+	SAFs werden verwendet, wo sie günstig produziert werden können, was Transportwege reduziert.	Gesamtmenge des CO ₂ ist klar definiert und eine volkswirtschaftlich effiziente Allokation wahrscheinlich.	Bei nahezu vollständig klimaneutralem Fliegen müssen ohnehin alle Flugzeuge SAFs verwenden	Keine Auswirkung auf Betriebsabläufe CO ₂ -Senken ggfls. günstiger als Emissionsvermeidung
-	Risiko doppelter Buchung der CO ₂ -Reduktion / grünen Eigenschaft ist hoch (siehe Grünstrom).	Die korrekte Buchung von CO ₂ -Emissionen bei außereuropäischen Flügen ist herausfordernd.	Logistikkosten sind hoch und der Transport von SAFs könnte zusätzliche Emissionen verursachen.	Risiko doppelter Buchung der CO ₂ -Reduktion / grünen Eigenschaft ist hoch (siehe Grünstrom).
Analog.	Handel mit Grünstromzertifikaten in Europa	EU Emission Trading System	Beimischung von Bioethanol in E10 Ottokraftstoff	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Corsia), CO ₂ -Kompensation

Trends

Prognosen

Klimawirkung

Energieträger

Unternehmen

Accounting

Kontakt

Ansprechpartner*innen:

Christopher Hecht

Christopher.Hecht@isea.rwth-aachen.de

Thomas Hild

Thomas.Hild@dechema.de

Andrea Lübcke

luebcke@acatech.de

www.wasserstoff-kompass.de

acatech – Deutsche Akademie der
Technikwissenschaften

Geschäftsstelle

Karolinenplatz 4

80333 München

Hauptstadtbüro

Pariser Platz 4a

10117 Berlin

T +49 (0)30/2 06 30 96-0

F +49 (0)30/2 06 30 96-11

info@acatech.de

www.acatech.de

DECHEMA Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e.V.

Theodor-Heuss-Allee

2560486 Frankfurt am Main

T +49 (0)69 75 64-0

info@dechema.de

www.dechema.de

Impressum

- „Klimaneutralität in der Luftfahrt – durch alternative Energieträger“
- Herausgeber: acatech, Berlin, und DECHEMA, Frankfurt am Main, 2022 V.i.S.d.P.: Christoph Uhlhaas
- Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums: Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Dr. Stefan Oschmann, Dr.-Ing. Reinhard Ploss, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
- Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Dr.-Ing. Reinhard Ploss, Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Manfred Rauhmeier
- Redaktion: Christopher Hecht/acatech, Thomas Hild/DECHEMA, Damien Rolland/DECHEMA, Michaela Löffler/acatech, Dr. Andrea Lübcke/acatech, Layout-Konzeption: Lars Ole Reimer
- Empfohlene Zitierweise: acatech, DECHEMA (Hrsg.): Klimaneutralität in der Luftfahrt – durch alternative Energieträger, Berlin 2022.
<https://www.wasserstoff-kompass.de/news-media/dokumente/flugverkehr>

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages