

Factsheet 5: Die Zukunftsperspektiven



Copyright: fStopImages/Malte Müller

Langfristig geht es nur ohne: Wollen wir die Erderhitzung auf 1,5°C begrenzen, müssen auch die CO₂-Emissionen aus dem Luftverkehr auf Null gesenkt werden und die Wirkung von Nicht-CO₂-Effekten stark reduziert werden. Nur so können die Klimaziele wirklich eingehalten werden.

Im Folgenden widmen wir uns der Frage, was dies für die Zukunft des Luftverkehrs bedeutet. Wir skizzieren seine Möglichkeiten, aber auch seine Grenzen in den nächsten Jahrzehnten. Welche Prognosen gibt es für die zukünftige Entwicklung des Luftverkehrs (siehe Kapitel 1)? Welche Technologien stehen zur Verfügung, um unvermeidbare Flüge in der Zukunft klimafreundlicher zu machen? Wie groß ist ihr Potenzial, Emissionen zu vermeiden und werden sie „rechtzeitig“ zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 2)?

Der Kombi-Effekt

Klar ist: Wir brauchen eine Kombination von unterschiedlichen Maßnahmen. Der einfachste und effektivste Weg für Klimaschutz im Luftverkehr ist natürlich die Vermeidung von Flügen. So bietet etwa die Digitalisierung große Chancen, die Zahl der Dienstreisen zu reduzieren. Aber auch die Häufigkeit von privaten Fernreisen muss hinterfragt werden. Ein zweites wichtiges Element ist die Verlagerung von Kurzstreckenflügen auf die Bahn. Zusätzlich werden aber auch neue Technologien nötig sein, um die Klimawirkung von Flügen stark zu begrenzen – so die Nutzung von Wasserstoff oder synthetischem Kerosin.

Inhaltsverzeichnis

1	ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DES LUFTVERKEHRS	3
1.1	Prognostizierte Entwicklung des Luftverkehrs	3
1.2	Energieverbrauch und Effizienz	3
1.3	Auswirkungen von Covid-19 auf den Luftverkehr	4
1.4	Wege für den Klimaschutz nach der Pandemie	5
2	TECHNOLOGIEN FÜR MEHR KLIMASCHUTZ	5
2.1	Verbesserte Energieeffizienz	7
2.2	Einsatz von alternativen Kraftstoffen	8
2.3	Wasserstoffflugzeuge	10
2.4	Elektroflugzeuge	11
2.5	Ein Technologiemix für die Zukunft	11
3	LITERATURVERZEICHNIS UND WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN	14

1 ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DES LUFTVERKEHRS

Abbildung 1: Luftfahrt – eine Zukunftsvision



Quelle: Öko-Institut 2020

1.1 Prognostizierte Entwicklung des Luftverkehrs

Die Zahl der Passagierinnen und Passagiere sowie die Emissionen aus dem Luftverkehr sind bislang nahezu kontinuierlich gewachsen. Allein zwischen 2013 und 2018 erhöhten sich die Emissionen jährlich um 5 % (Lee et al. 2020). Prognosen, die vor Beginn der Covid-19-Pandemie erstellt wurden, schreiben das Wachstum in der Zukunft fort. So gingen Expertinnen und Experten davon aus, dass die Verkehrsleistung auch weiter um mehr als 4 % pro Jahr wachsen wird. Damit würde es 2050 weltweit fast vier Mal so viel Luftverkehr geben wie noch 2015 (ICAO 2018, S. 3; ICAO 2019a, S. 18).

Der Anteil am Luftverkehr ist jedoch sehr ungleich verteilt, sowohl zwischen Einkommensgruppen als auch regional (siehe Factsheet 1). Für Asien und insbesondere Schwellenländer mit wachsenden Mittelschichten werden daher zum Beispiel höhere Wachstumsraten vorhergesagt als für die Industrieländer (ICAO 2018).

1.2 Energieverbrauch und Effizienz

Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO geht davon aus, dass der Kerosinverbrauch bis 2050 im Vergleich zu 2015 um das 2,4 bis 3,8-Fache steigen wird – je nachdem, wie viel effizienter Flugzeuge weiter werden. Zwar ist der Verbrauch in Bezug auf die geflogenen Passagierkilometer über die vergangenen Jahrzehnte deutlich gesunken, doch wächst das Verkehrsaufkommen deutlich schneller als die Effizienz. Auch unter den optimistischsten Annahmen für technologische

Entwicklungen und Effizienzverbesserungen erwartet die ICAO bezogen auf die Verkehrsleistung nur eine jährliche Senkung des Brennstoffverbrauchs um 1,37 % bis 2050 (ICAO 2019a, S. 21).

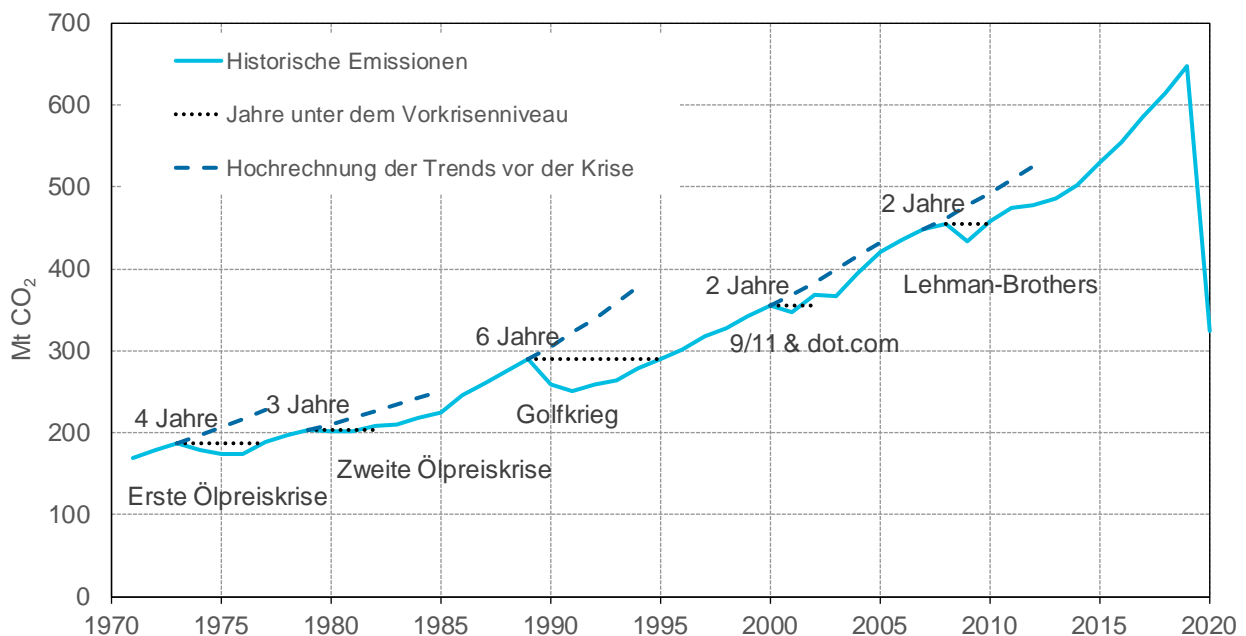
1.3 Auswirkungen von Covid-19 auf den Luftverkehr

Die Covid-19-Pandemie hat 2020 zu einem unerwarteten, drastischen und beispiellosen Rückgang des Luftverkehrs geführt. Im Herbst 2020 wird sowohl für Deutschland, in der EU als auch weltweit erwartet, dass in diesem Jahr weniger als halb so viele Flugzeuge in der Luft sein werden wie 2019 (siehe Factsheet 1).

Im Herbst 2020 ist das Ende der Einschränkungen des Luftverkehrs durch die Pandemie noch nicht abzusehen. Wird die Entwicklung eines Impfstoffs dazu führen, dass die Menschen weltweit zu ihrem alten Reiseverhalten zurückkehren? Oder wird die Krise auch langfristig zu weniger Luftverkehr führen? Dies sind wichtige, aber noch ungeklärte Fragen.

Auch in der Vergangenheit gab es Ereignisse und Krisen, die die CO₂ Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr sinken ließen – so die Wirtschaftskrise der Jahre 2007 und 2008, die Auswirkungen der Terroranschläge von 2001 oder der Zweite Golfkrieg Anfang der 1990er Jahre. Doch nach diesen Krisen ist der Luftverkehr innerhalb von zwei bis sechs Jahren zum Vorkrisenniveau zurückgekehrt. Innerhalb weniger Jahre waren zudem wieder die Wachstumsraten erreicht, die es vor der Krise gab, wenn auch mit etwas niedrigeren Gesamtemissionen (Öko-Institut 2020, S. 2). Und auch Prognosen aus dem Herbst 2020 gehen davon aus, dass innerhalb von fünf Jahren wieder das Verkehrsaufkommen von 2019 erreicht sein wird (DFS 2020; IATA 2020).

Abbildung 2: Globale CO₂- Emissionen durch den internationalen Luftverkehr



Quelle: Öko-Institut 2020

Gleichzeitig zeichnen einzelne Stimmen ein Szenario, in dem die Krise zu langfristig niedrigeren Wachstumsraten des Luftverkehrs führen könnte als bisher (Roland Berger 2020). Faktoren, die dazu beitragen können, sind:

- Weniger Reisen auch nach Ende der Pandemie, etwa weil Dienstreisen weiterhin verstärkt durch virtuelle Meetings ersetzt werden (siehe Factsheet 3). Alleine durch die Pandemie wird sich unser privates Reiseverhalten aber nicht grundlegend ändern, hierfür braucht es ein stärkeres Umdenken.
- Das Knüpfen von finanzieller Unterstützung für die Branche an die Bedingung, klimaschädliche Emissionen aus dem Luftverkehr zu reduzieren. Bisher haben allerdings nur zwei Staaten – Frankreich und Österreich – solche Bedingungen als nicht-verpflichtende Voraussetzungen für Hilfszahlungen aufgestellt (siehe Factsheet 2).
- Einsatz der effizientesten Flugzeuge bei der Wiederaufnahme des Luftverkehrs. So lange technologische Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz allerdings nur langsam voranschreiten, steigen die Emissionen wieder (siehe Kapitel 2.1).

Das globale Netzwerk der Luftverkehrsindustrie ATAG (Air Transport Action Group) prognostiziert im Herbst 2020, dass in 2050 etwa 10 Milliarden Passagiere pro Jahr mit dem Flugzeug unterwegs sein werden. Das sind mehr als doppelt so viele wie 2019, aber 16 % weniger als in früheren Prognosen aufgrund der Auswirkungen der Covid-19 Pandemie (ATAG 2020, 16; 22).

1.4 Wege für den Klimaschutz nach der Pandemie

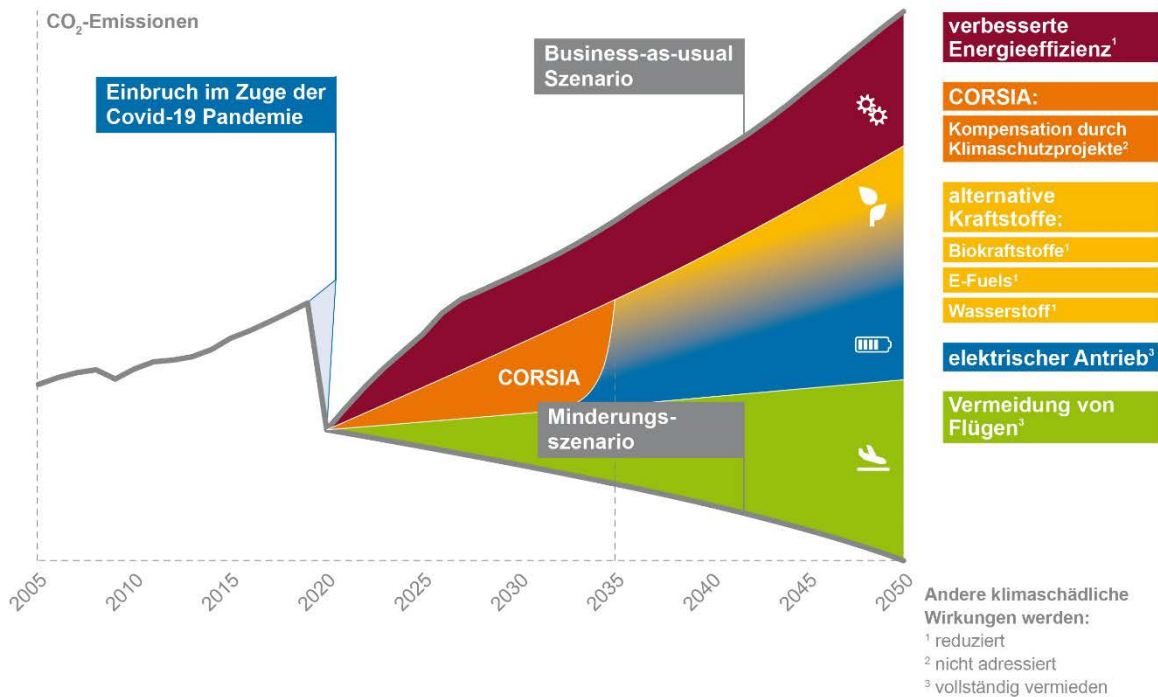
Ein Instrument, das für mehr Klimaschutz im Luftverkehr sorgen sollte, hat in Folge der Covid-19-Pandemie jedoch deutlich an Wirksamkeit verloren: Im Juni 2020 hat die ICAO die Regeln für das CORSIA Abkommen angepasst: Durch die Änderung des Referenzwertes, im Vergleich zu dem Airlines ihr Emissionswachstum in Zukunft kompensieren müssen, wird die Nachfrage nach Kompensationszertifikaten in den kommenden Jahren drastisch sinken. Dadurch wird das Instrument nahezu wirkungslos für den Klimaschutz (siehe Factsheet 2).

Der Wiederaufbau nach der Covid-19-Pandemie sollte aus unserer Sicht als Gelegenheit wahrgenommen werden, den Luftfahrtsektor durch klimaschutzorientierte Regulierung (siehe Factsheet 2), stärkere Vorgaben für die Emissionsreduktion und den Einsatz von alternativen Kraftstoffen, die Förderung von technologischen Innovationen (siehe Kapitel 2.2) und das Vermeiden von Flugreisen (siehe Factsheet 3) grüner zu gestalten. Zum ungebremsten Wachstum des Luftverkehrs sollten wir jedenfalls nicht zurückkehren.

2 TECHNOLOGIEN FÜR MEHR KLIMASCHUTZ

Es wird ihn auch in Zukunft geben: Luftverkehr, der sich nicht vermeiden lässt. Für diesen können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden, um die Klimawirkung zu reduzieren und möglichst vollständig zu vermeiden. Dafür gibt es langfristig vor allem zwei Möglichkeiten: den Einsatz alternativer Kraftstoffe – so etwa von E-Fuels (die auch synthetische Kraftstoffe genannt werden) oder nachhaltigen Biokraftstoffen – sowie alternative Antriebskonzepte wie Wasserstoff- und Elektroflugzeuge (siehe Kapitel 2).

Abbildung 3: Wie die Treibhausgasemissionen im Luftverkehr gesenkt werden können



Quelle: Öko-Institut 2020

Egal, welchen Weg man wählt, auch die Erhöhung der Energieeffizienz spielt eine wesentliche Rolle. Denn sie kann nicht nur die spezifischen CO₂-Emissionen pro Fluggast reduzieren und die hohen Kraftstoffkosten von E-Fuels abfedern, sondern auch die Reichweite von Flugzeugen mit alternativen Antriebskonzepten erhöhen. Für alle technologischen Optionen wird entscheidend sein, wie schnell sie zur Verfügung stehen. Denn: Die Entwicklung neuer Antriebe und Flugzeugtypen und der Aufbau einer Infrastruktur für die Bereitstellung von Wasserstoff und für die Herstellung von E-Fuels brauchen erhebliche Vorlaufzeiten.

Die Flugindustrie selbst geht nicht davon aus, dass vor 2060/2065 Netto-Null Emissionen im Luftverkehr erreicht werden können (ATAG 2020, S. 27). Für das Klima ist das reichlich spät. Deswegen spielt die Vermeidung von Flügen bei der Dekarbonisierung des Luftverkehrs auch eine wichtige Rolle.

Mittelfristig – also zwischen 2021 und 2035 – soll außerdem das neue Instrument der internationalen Zivilluftfahrtorganisation namens CORSIA einen Teil der Emissionen aus dem Luftverkehr begrenzen, vor allem durch den Kauf von Kompensationszertifikaten ausgleichen. Der Beitrag dieses internationalen Instruments zum Klimaschutz ist aber insgesamt viel zu gering (siehe Factsheet 2). Langfristig kann die Kompensation von Emissionen aus dem Luftverkehr aber keine Rolle mehr spielen. Bis 2050 müssen wir unsere Wirtschaftssysteme so umbauen, dass nahezu keine Emissionen mehr entstehen. Natürliche oder technische Senken, die CO₂ aufnehmen, werden gebraucht werden, um verbleibende Emissionen z.B. aus der Landwirtschaft oder industriellen Prozessen auszugleichen, die nicht vermieden werden können. Diese Senken werden aber voraussichtlich nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen, um Emissionen aus dem Luftverkehr zu kompensieren.

Da die gesamte klimaschädliche Wirkung des Luftverkehrs größer ist als nur der Effekt der CO₂-Emissionen müssen bei der Gestaltung von jeglichen Maßnahmen für den Luftverkehr in Zukunft

auch die anderen klimaschädlichen Wirkungen des Luftverkehrs berücksichtigt werden (siehe Factsheet 1).

2.1 Verbesserte Energieeffizienz

Die Effizienz kann durch betriebliche und durch technische Maßnahmen erhöht werden:

- **Betriebliche Maßnahmen**

Zu den betrieblichen Maßnahmen gehören etwa ein verbessertes Luftraummanagement zur Vermeidung von Umwegen, effiziente Flugverfahren wie einen langsameren Sinkflug, eine klimaorientierte Optimierung von Geschwindigkeit und Flugprofilen sowie eine erhöhte Flugzeugauslastung.

- **Effizientere Flugzeugantriebe**

Teil der technischen Maßnahmen sind zum Beispiel optimierte Flugzeugantriebe. Heute sind in Verkehrsflugzeugen vor allem Mantelstromtriebwerke verbreitet. Sie produzieren den Großteil des Antriebsschubes nicht im Hauptstrom, in dem Luft in das Triebwerk eingesaugt und verdichtet wird und dann zur Kerosinverbrennung genutzt wird, sondern im Nebenstrom, der die Brennkammer nicht passiert. Durch eine Erhöhung des Verhältnisses von Nebenstroms zu Hauptstrom kann der Kraftstoffverbrauch reduziert werden.

Als vielversprechend wird beispielsweise das Konzept des Open Rotors angesehen, bei dem große, außenliegende Schaufelräder für ein Nebenstromverhältnis von 30:1 im Vergleich zu 11:1 oder 12:1 bei modernen Triebwerken realisierbar sein sollen. Allerdings attestiert die Internationale Energieagentur IEA hierfür einen Technologie-Reifegrad von 4, die Bezeichnung für einen frühen Prototyp beziehungsweise einen Prototyp, der sich unter Testbedingungen bewährt hat (IEA 2020). Es muss also noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden – etwa mit Blick auf die höhere Lärmentwicklung. Triebwerke mit Untersetzungsgetriebe (Getriebefan) sind etwas weiter in der Entwicklung. Sie sollen Flugzeuge mit einem sehr hohen Nebenstromverhältnis von 14:1 bis 16:1 bewegen und eine geringere Lärmbelastung als aktuelle Triebwerke aufweisen.

- **Effizienterer Flugzeugbau**

Es gibt aber auch Möglichkeiten, den Energieverbrauch unabhängig vom Antriebskonzept zu reduzieren. So können die aerodynamischen Eigenschaften der Flugzeuge verbessert werden, zum Beispiel durch eine besonders glatte Oberflächenbeschaffenheit oder die Ausstattung mit den bereits verbreiteten Winglets, also gebogenen Flügelspitzen. Auch Leichtbau kann das Gewicht und damit den Kraftstoffverbrauch senken. Dies kann in Zukunft auch durch neuartige, aerodynamisch optimierte Flugzeugformen wie den Blended Wing Body (BWB) erreicht werden: Bei ihm gehen die Flügel und ein abgeflachter Rumpf, der wiederum zum Auftrieb beiträgt, fließend ineinander über.

Langsame Entwicklung

Derzeit steigert sich die Effizienz des Fliegens jedoch zu langsam. Das von der ICAO gesteckte Ziel, den Treibstoffverbrauch je Passagierkilometer jedes Jahr um 2 % zu senken, wird 2020 wahrscheinlich nicht erreicht (ICAO 2019b, S. 1; 2019a, 21ff.). Derzeit liegen die Effizienzgewinne bei etwa 1-1,5 % (ICCT 2020, S. 5).

2.2 Einsatz von alternativen Kraftstoffen

Schon heute verfügbare Technologien mit „besseren“ Kraftstoffen nutzen? Das könnte durch alternative Kraftstoffe auf Basis von Biomasse und Strom möglich werden: Biokraftstoffe aus nachhaltigen biogenen Quellen sowie E-Fuels oder synthetische Kraftstoffe, die mit Hilfe von erneuerbarem Strom synthetisch hergestellt werden.

- **Nutzung mit bestehender Infrastruktur möglich**

Alternative Kraftstoffe können als **Drop-in-Kraftstoffe** unmittelbar fossilen Kraftstoffen beigemischt werden und nicht allein in neuen Flugzeuggenerationen die Emissionen senken, sondern auch im Bestand sowie in konventionellen Flugzeugen, die in den kommenden Jahren in den Bestand gehen. Dies ist deshalb wichtig, da Flugzeuge in der Regel eine lange Lebensdauer von bis zu 30 Jahren besitzen. Zudem ist der Einsatz von alternativen Drop-in-Kraftstoffen auch bei Langstreckenflügen möglich, für den die alternativen Optionen wie Elektro- und Wasserstoffantrieb vorerst ungeeignet scheinen.

Drop-in-Kraftstoffe: Alternative Kraftstoffe, die dem Flugzeugkerosin direkt beigemischt werden können.

Für die Luftfahrtindustrie sind beim Einsatz alternativer Kraftstoffe nur wenige Umstellungen der Infrastruktur und des Betriebes notwendig. Dennoch machen die nachhaltigen Kraftstoffe im Luftverkehr in der EU nur einen Anteil von 0,05 % aller verwendeten Treibstoffe aus. Die EU-Kommission schätzt, dass sich dieser Anteil bis 2050 nur auf maximal 2,8 % erhöhen wird, wenn keine zusätzlichen Maßnahmen zur Förderung dieser Kraftstoffe ergriffen werden. Ein wichtiger Grund hierfür: Bisher sind nachhaltige Kraftstoffe um ein Vielfaches teurer als Kerosin (European Commission 2020, S. 3).

- **Die Zukunft von Biokraftstoffen**

Es ist noch ungewiss, inwiefern nachhaltige Biokraftstoffe in Zukunft im Luftverkehr zum Einsatz kommen können. Theoretisch wäre es möglich, den Kraftstoffbedarf zu 100 % aus nachhaltigen Biokraftstoffen zu decken, die aus energiereichen Pflanzen, landwirtschaftlichen Reststoffen wie Stroh, Mikroalgen oder Abfällen wie Ölen und Fetten hergestellt werden. So könnten mehr als 60 % der CO₂-Emissionen aus dem Luftverkehr vermieden werden. Allerdings wären extrem hohe Investitionen nötig, um die Infrastruktur zur Erzeugung dieser Kraftstoffe aufzubauen. Auch müssten die politischen Rahmenbedingungen wie beispielsweise die Ausgestaltung der CO₂-Bepreisung dazu beitragen, dass die notwendigen Kraftstoffmengen produziert werden können.

Sollen solche Kraftstoffe für den Luftverkehr genutzt werden, würde dies zudem die bisherige Produktion von Ethanol oder Biodiesel für den Straßenverkehr übersteigen (ICAO 2019b, S. 2–3). Gleichzeitig wären immense Wassermengen und große Flächen notwendig, um Pflanzen anzubauen, die als Energiequelle dienen. Dies steht in Konflikt mit der Nutzung dieser Flächen für andere Zwecke (Öko-Institut 2019) – so sind zusätzliche Ackerflächen unverzichtbar, um Nahrungsmittel anzubauen und eine wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. In naher Zukunft werden Biokraftstoffe daher nur in begrenztem Umfang zum Einsatz kommen (ICAO 2019b, S. 1; 2019a, 21ff.). Für nachhaltigeres Fliegen sind sie keine sinnvolle und realistische Lösung.

Was sind E-Fuels?

E-Fuels ähneln in ihrer chemischen Zusammensetzung fossilen Kraftstoffen wie zum Beispiel Kerosin. Im Gegensatz zu diesen stammt die Energie bei E-Fuels aber nicht aus fossilem Rohöl, sondern aus Strom. Dieser Strom wird zur Auftrennung von Wasser in dessen chemische Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) mittels Elektrolyse genutzt. Der so hergestellte Wasserstoff kann als stoffliche Grundlage für weitere Prozesse eingesetzt werden.

In dem nachfolgenden Syntheseprozess findet die Umwandlung von Kohlendioxid und Wasserstoff in Kohlenwasserstoffe statt, die dann zum Beispiel zu Kraftstoffen weiterverarbeitet werden. Hierfür wird neben dem Wasserstoff eine Kohlenstoffquelle benötigt. Auch diese muss einen nicht fossilen Ursprung haben, damit die Kraftstoffe einen Klimavorteil mit sich bringen. Als nachhaltige Quelle kann CO₂ aus biogenen Abgasströmen genutzt werden, so beispielsweise aus der Bioethanol- und Biogasherstellung. Diese Abgasströme haben einen sehr hohen CO₂-Anteil, so dass die Abscheidung verhältnismäßig wenig Strom verbraucht (0,1 – 0,6 Megajoule (MJ) je kg CO₂). Allerdings sind die Mengenpotenziale beschränkt und die Erzeugungsanlagen weit über das Land verteilt, so dass sich dieser Weg tendenziell weniger gut für die großindustrielle E-Fuel-Produktion eignet. Die Abtrennung von CO₂ aus der Luft stellt in diesem Zusammenhang eine weitere Möglichkeit dar, allerdings ist der Energieverbrauch aufgrund der geringen CO₂-Konzentration in der Luft (0,04 %) mit 0,7–1,8 MJ (Strom) und 5,4–9,0 MJ (Wärme) pro kg Kohlendioxid deutlich höher (Öko-Institut 2020).

- **Vor- und Nachteile von E-Fuels**

Während das Mengenpotenzial nachhaltiger Biokraftstoffe für den Luftverkehr als eingeschränkt gilt, wird das Potenzial von PtL langfristig als ausreichend beurteilt (UBA 2015; 2019). Ein Referentenentwurf aus dem Umweltministerium sieht ab 2026 eine Mindestquote für erneuerbare Flugturbinenkraftstoffe nicht biogenen Ursprungs von 0,5 % vor. Bis 2028 soll die Quote auf 1 % und bis 2030 auf 2 % steigen. Zusätzlich sollten Maßnahmen ergriffen werden, um die Erzeugung dieser Kraftstoffe zu fördern.

Wichtig ist es, frühzeitig Nachhaltigkeitskriterien festzulegen – für hierzulande hergestellte Kraftstoffe ebenso für jene, die importiert werden. Das gilt insbesondere für:

- den Strombezug bei der Herstellung und die Integration in das Stromsystem,
- die CO₂-Quelle für die Herstellung von Kohlenwasserstoffen sowie
- weitere soziale und ökologische Herausforderungen.

Der Strombezug ist für die Klimaschutzwirkung strombasierter Stoffe am relevantesten. Denn wenn der Strom mit fossilen Brennstoffen erzeugt wird, können durch die Herstellung von E-Fuels sogar mehr Emissionen verursacht werden.

Ein Nachteil synthetischer Kraftstoffe liegt im begrenztem Treibhausgasminderungspotenzial: Zwar lassen sich (fossile) CO₂-Emissionen vermeiden, die Nicht-CO₂-Effekte (siehe Factsheet 1) der Emissionen bleiben jedoch weiter relevant. Insgesamt wird geschätzt, dass sich die Klimawirkung durch den Einsatz von E-Fuels nur um etwa 30 % bis 60 % verringern lässt (Clean Sky 2 JU und FCH 2 JU 2020).

Darüber hinaus wäre ein massiver, zusätzlicher Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig, um den Strombedarf für E-Fuels und Elektroflugzeuge (siehe Kapitel 2.4) nachhaltig decken zu können. Nach Berechnungen des Öko-Instituts müsste derzeit die gesamte deutsche erneuerbare Stromproduktion dazu eingesetzt werden, um die Menge an Kerosin, die in Deutschland getankt wird, mit nachhaltig produzierten E-Fuels zu ersetzen. Allerdings brauchen wir auch weiterhin erneuerbaren Strom für viele andere Zwecke wie z.B. Licht, Wärme oder Züge. Global gesehen ist die Situation ähnlich.

2.3 Wasserstoffflugzeuge

Eine langfristige Option könnten auch mit Wasserstoff betriebene Flugzeuge sein: Wasserstoff kann aus erneuerbarem Strom hergestellt und könnte an Bord entweder in Turbinen verbrannt oder in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt werden, der die Propeller betreibt. Auch Hybridsysteme sind denkbar, die sowohl Turbinen als auch Brennstoffzellensysteme nutzen.

Schon in den 1980er Jahren wurde Wasserstoff im Luftverkehr erprobt: Der Prototyp Tupolew Tu-155 nutzte Flüssigwasserstoff in einem Strahltriebwerk. Inzwischen wird in diesem Bereich wieder verstärkt geforscht: Seit dem Jahrtausendwechsel wurden mehrere Brennstoffzellen-Kleinflugzeuge als Prototypen analysiert; Airbus hat angekündigt, bis 2035 ein Wasserstoff-Flugzeug auf den Markt zu bringen, das mittlere Strecken von bis zu 4.000 Kilometern zurücklegen kann (Airbus 2020).

- **Technik, Temperatur und Tanks**

Es ist sinnvoll, Wasserstoff in flüssiger Form zu nutzen, da er so eine höhere Energiedichte hat. Er wird dabei bei -253 °C in isolierten Tanks gespeichert. Trotz Isolierung kann es jedoch zum so genannten Boil-Off kommen: dem Verdampfen von H_2 und damit zu Energieverlusten. Entsprechende Sicherheitssysteme sind notwendig, damit vom Boil-Off keine Gefahr ausgeht.

Verflüssigter Wasserstoff hat eine auf das Volumen bezogene Energiedichte von etwa 8,5 Megajoule pro Liter (MJ/l) und liegt damit etwa drei Viertel unter Kerosin (35 MJ/l). Die Wasserstoffspeicherung nimmt deshalb deutlich mehr Raum im Flugzeug ein. Darüber hinaus haben die Tanks ein hohes Gewicht, bei heutigen Prototypen macht der Wasserstoff nur einen Anteil von 20 % am Gesamtgewicht des gefüllten Tanks aus. Zukünftig müssten die Tanks so verbessert werden, dass dieses Verhältnis auf etwa 35 bis 40 % erhöht werden kann. Doch auch dann wird erwartet, dass Wasserstoffflugzeuge deutlich schwerer sein werden als heutige Flugzeuge. Je nach Flugzeugtyp – so etwa Regional- oder Langstreckenflugzeug – und Antriebssystem könnte sich das maximale Startgewicht um 10 bis 23 % erhöhen. Dies wirkt sich wiederum negativ auf den Energieverbrauch aus: Er könnte bei einem Langstreckenflugzeug um über 40 % steigen.

- **Potenzial für Emissionssenkungen**

Was bedeutet die Verwendung von Wasserstoff für den Klimaschutz? Unter Berücksichtigung der Nicht- CO_2 -Effekte gehen Schätzungen davon aus, dass der Einsatz von Wasserstoff die Klimawirkung um 50 bis 75 % reduzieren kann, wenn er als Brennstoff genutzt wird. Im Falle der Nutzung in Brennstoffzellen wird sogar eine Minderung um 75 bis 90 % erwartet.

- **Technisch aufwändig, Zukunft unklar**

Aus heutiger Sicht ist der Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt eine technisch aufwändige Lösung, die voraussichtlich nicht vor 2035 in relevanten Anwendungen eingesetzt werden dürfte. Ausnahmen wie die bereits in der Entwicklung befindlichen Kleinstflugzeuge sind eher als Proof-of-Concept zu sehen. Weiterhin ist aus heutiger Perspektive unklar, wie groß die Potenziale für

nachhaltig erzeugten grünen Wasserstoff mittelfristig überhaupt sind. Dies wird es 2050 umso wichtiger machen, einen erheblichen Anteil der Flüge zu vermeiden und diese saubere Technologie, sofern sie bis dahin marktreif ist, nur bei nicht vermeidbaren Flügen einzusetzen.

2.4 Elektroflugzeuge

Batterieelektrische Flugzeuge werden mit Elektrotriebwerke betrieben, die ihre Energie aus Akkus beziehen. Im Flugbetrieb könnte der batterieelektrische Antrieb die klimafreundlichste Option im Luftverkehr darstellen: Es entstehen keine CO₂-Emissionen, auch Nicht-CO₂-Effekte treten im Gegensatz zu alternativen Kraftstoffen und mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen nicht auf (siehe Factsheet 1). Norwegen – das bei der Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs am weitesten vorangeschrittene Land – hat 2018 verkündet, dass bis 2040 alle nationalen Kurzstreckenflüge elektrisch durchgeführt werden sollen.

Eine Technik in der Entwicklung

Die Entwicklung von batterieelektrischen Verkehrsflugzeugen und von Flugzeugen mit Hybridkonzept steht noch am Beginn. Die Internationale Energieagentur (IEA 2020) nennt für batterieelektrische Flugzeuge einen Technologie-Reifegrad von 4, bezeichnet sie also als frühen Prototyp oder unter Testbedingungen bewährten Prototyp. Dennoch kommt der elektrische Antrieb bereits zur Anwendung – so zum Beispiel in Kleinflugzeugen wie dem Airbus E-Fan. Im Probetrieb befinden sich zudem erste umgerüstete Passagiermaschinen mit Platz für bis zu neun Fluggäste; ein gewerblicher Einsatz einer umgebauten Cessna wird für 2021 angestrebt. Allerdings sind die mögliche Flugdauer und die Reichweite mit 30 Minuten und etwa 160 Kilometern noch sehr gering.

Der größte Nachteil batterieelektrischer Antriebe im Vergleich zu Kerosin sind die geringe Energiedichte und damit das hohe Gewicht der Lithium-Ionen-Batterien. Laut dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt müsste ein vollelektrischer A320 für einen 20-minütigen Flug mit einer 50 Tonnen schweren Batterie ausgestattet sein, was einem Drittel des maximalen Startgewichts des Flugzeuges entspricht (DLR 2017). Um größere Flugzeuge elektrisch zu betreiben, ist daher eine deutlich höhere Energiedichte der Akkus erforderlich.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden neben batterieelektrischen Flugzeugen auch Hybridkonzepte erforscht. Airbus hat beispielsweise das Konzeptflugzeug E-Thrust entwickelt, das neben Elektromotoren über ein herkömmliches Jet-Triebwerk am hinteren Rumpf verfügt, um damit beim Starten zusätzlichen Schub zu erzeugen. In der Reiseflughöhe würde das Jet-Triebwerk stark gedrosselt und damit nur noch Strom erzeugt, um die Elektrotriebwerke des Verkehrsflugzeuges anzutreiben.

Aus heutiger Sicht scheint es wahrscheinlich, dass noch 20 bis 30 Jahre vergehen werden, bis Elektroantriebe in Verkehrsflugzeugen in relevantem Umfang eingesetzt werden. Und auch dann wird sich der Einsatz auf kleinere Flugzeuge und Kurzstrecken von maximal 500 bis 1.000 Kilometern beschränken (McKinsey 2020). Eine Entfernung, für die sich häufig der Schienenverkehr gut eignet. Hierfür batterieelektrische Flugzeuge zu nutzen, macht deshalb nur da Sinn, wo keine Schieneninfrastruktur errichtet werden kann, beispielsweise für den Flug auf Inseln.

2.5 Ein Technologiemix für die Zukunft

Es gibt also mehrere Möglichkeiten, den nicht vermeidbaren Luftverkehr in Zukunft klimafreundlicher zu gestalten. Die Optionen haben Vor- und Nachteile. Bis sie in relevanter Größe zur Anwendung kommen wird es, je nach Option, vermutlich jedoch noch mindestens 20 bis 30 Jahre dauern, weil

entweder die Technologien noch nicht ausgereift oder die verfügbaren Mengenpotenziale der Kraftstoffe kurzfristig nicht ausreichend sind.

Tabelle 1: Vergleich neuer Technologien und nachhaltiger Flugkraftstoffe

	Biokraftstoffe	E-Fuels	Batterie-elektrisch	Wasserstoff
Zubringer < 19 Sitzplätze				
Regionalstrecke 20-80 Sitzplätze			maximale Reichweite bis zu 500-1000 km	keine Einschränkungen der Reichweite
Kurzstrecke 81-165 Sitzplätze	keine Einschränkungen der Reichweite			
Mittelstrecke 166-265 Sitzplätze			nicht anwendbar	revolutionäres Flugzeugdesign für Reichweiten über 10.000 km erforderlich
Langstrecke >250 Sitzplätze				
Hauptvorteil	Drop-In-Kraftstoff – keine oder nur kleinere Änderungen an Flugzeug und Infrastruktur notwendig	Drop-In-Kraftstoff – keine oder nur kleinere Änderungen an Flugzeug und Infrastruktur notwendig	Keine Klimawirkung während des Fluges	Hohes THG-Reduktionspotenzial (50 bis 75% Turbine, 75-90% Brennstoffzelle)
Hauptnachteil	Stark eingeschränkte Minderung der Nicht CO ₂ -Effekte	Eingeschränkte Minderung der Nicht CO ₂ -Effekte (THG Minderung 30-60%)	Infrastruktur-anpassung notwendig, Technologie noch nicht ausgereift	Infrastruktur-anpassung notwendig, Technologie noch nicht ausgereift

Quelle: Clean Sky 2 JU und FCH 2 JU 2020, angepasst

Bis 2050 könnte der Technologiemix aus Elektro- und Wasserstoffflugzeugen für den Kurzstreckenverkehr sowie alternativen Kraftstoffe für den Fernverkehr jedoch dazu beitragen, die Treibhausgasemissionen nicht vermeidbarer Flüge zu verringern. Um diese Flüge vollständig emissionsfrei zu gestalten, könnte zudem der Betrieb des Luftverkehrs angepasst werden. So könnten etwa niedrigere Reiseflughöhen gewählt werden, um die Nicht-CO₂-Effekte ebenfalls vollständig zu vermeiden. Für Nicht-CO₂-Effekte, die auch dadurch nicht vermeidbar sind, könnte das sogenannte **DACCS-Verfahren (Direct Air Carbon Capture and Storage)** zum Ausgleich angewendet werden. Dabei wird CO₂ aus der Luft abgeschieden und geologisch eingelagert, um es der Atmosphäre zu entziehen.

DACCS-Verfahren: DACCS ist ein Verfahren, bei dem CO₂ aus der Luft abgeschieden und geologisch eingelagert wird, um es der Atmosphäre zu entziehen.

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

Kontakt zum Öko-Institut

Projektleitung

Anne Siemons

Senior Researcher
Energie & Klimaschutz

Öko-Institut e.V., Geschäftsstelle Freiburg
Tel.: +49 761 45295-290
E-Mail: a.siemons@oeko.de

Zum Thema Zukunftstechnologien

Moritz Mottschall

Senior Researcher
Ressourcen & Mobilität

Öko-Institut e.V., Büro Berlin
Tel.: +49 30 405085-377
E-Mail: m.mottschall@oeko.de

Zum Thema Projektionen

Dr. Martin Cames

Leiter Energie & Klimaschutz (Berlin)
Energie & Klimaschutz

Öko-Institut e.V., Büro Berlin
Tel.: +49 30 405085-383
E-Mail: m.cames@oeko.de

Zum Thema CORSIA

Dr. Lambert Schneider

Senior Researcher
Energie & Klimaschutz

Öko-Institut e.V., Büro Berlin
Tel.: +49 30 405085-304
E-Mail: l.schneider@oeko.de

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

3 LITERATURVERZEICHNIS UND WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

- Airbus (2020): Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>.
- ATAG (2020): Waypoint 2050: Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency. Online verfügbar unter https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf.
- Clean Sky 2 JU; FCH 2 JU (2020): Hydrogen-powered aviation - A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Online verfügbar unter https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf.
- DFS (2020): Stagnation statt Erholung. Online verfügbar unter https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Presse/Pressemitteilungen/2020/30.09.2020.-%20Stagnation%20statt%20Erholung/.
- DLR (2017): Die Zukunft fliegt elektrisch! vom Lufttaxi bis zum Regionaljet. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/content/de/downloads/2017/die-zukunft-fliegt-elektrisch.pdf?_blob=publicationFile&v=4.
- European Commission (2020): ReFuelEU Aviation - sustainable aviation fuels. Inception impact assessment. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-ReFuelEU-Aviation-Sustainable-Aviation-Fuels>.
- IATA (2020): Covid-19: Outlook for air travel in the next 5 years. Online verfügbar unter <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/covid-19-outlook-for-air-travel-in-the-next-5-years/>.
- ICAO (2018): ICAO long-term traffic forecasts. Passenger and cargo. Online verfügbar unter https://www.icao.int/sustainability/documents/ltf_charts-results_2018edition.pdf.
- ICAO (2019a): Destination Green: The next chapter. 2019 Environmental Report Aviation and Environment. Online verfügbar unter [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf).
- ICAO (2019b): Trends in emissions that affect climate change. Online verfügbar unter https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange_Trends.aspx.
- ICCT (2020): Fuel burn of new commercial jet aircraft: 1960 to 2019. Online verfügbar unter <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Aircraft-fuel-burn-trends-sept2020.pdf>.
- IEA (2020): ETP Clean Energy Technology Guide. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>.
- Lee, D. S.; Fahey, D. W.; Skowron, A.; Allen, M. R.; Burkhardt, U.; Chen, Q.; Doherty, S. J.; Freeman, S.; Forster, P. M.; Fuglestedt, J.; Gettelman, A.; León, R. R. de; Lim, L. L. et al. (2020): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Atmospheric Environment, 117834. DOI: 10.1016/J.ATMOENV.2020.117834.
- McKinsey (2020). Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Online verfügbar unter [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20\(ID%208706035\).pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20(ID%208706035).pdf).
- Öko-Institut (2019): Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX, Diskussion der Anforderungen und erste Ansätze für Nachweiskriterien für eine klimafreundliche und nachhaltige Produktion von PtX-Stoffen. Impulspapier im Auftrag des BUND im Rahmen des Kopernikus-Vorhabens „P2X“. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Impulspapier-soz-oek-Kriterien-e-fuels.pdf>.

- Öko-Institut (2020): E-Fuels im Verkehrssektor. Kurzstudie über den Stand des Wissens und die mögliche Bedeutung von E-Fuels für den Klimaschutz im Verkehrssektor. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/E-Fuels-im-Verkehrssektor-Hintergrundbericht.pdf>.
- Öko-Institut (2020): Should CORSIA be changed due to the COVID-19 crisis? Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Should-CORSIA-be-changed-due-to-the-COVID-19-crisis.pdf>.
- Roland Berger (2020): Covid-19: How we will need to rethink the aerospace industry. Online verfügbar unter <https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/COVID-19-How-we-will-need-to-rethink-the-aerospace-industry.html>.
- UBA (2015): Schmied, M.; Wüthrich, P.; Zah, R.; Althaus, H.-J.; Friedl, C. Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung (Texte, 20/2015). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2015_postfossile_energieversorgungsoptionen.pdf.
- UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, RESCUE-Studie. Climate change 36/2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf.
- IEA (2020): ETP Clean Energy Technology Guide. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>.