



Auf dem Weg zu einem klimaneutralen Luftverkehr – nachhaltige Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte

Themenkurzprofil Nr. 53 | Sebastian Abel | Februar 2022

Die Notwendigkeit und Dringlichkeit, gangbare Wege für eine Transformation des Luftverkehrs hin zur Klimaneutralität zu entwickeln, steigen. Nicht nur trägt der globale Luftverkehr signifikant zur Klimaerwärmung bei, auch hat die Anzahl an Flügen in den letzten 20 Jahren weltweit deutlich zugenommen und Prognosen sagen einen noch stärkeren Anstieg bis zum Jahr 2050 voraus. Neue Kraftstoffe und Antriebskonzepte sind daher essenziell, um den Luftverkehr in Zukunft möglichst klimaneutral zu gestalten.

Die globale Luftfahrt ist bei Weitem die energieintensivste Form der Fortbewegung und ein starker Treiber der anthropogenen Klimaerwärmung. Ihr Anteil liegt derzeit bei 3,5 %, was mengenmäßig in etwa dem kompletten CO₂-Ausstoß Japans entspricht. Neben dem ausgestoßenen CO₂ tragen vor allem Kondensstreifen und Kondensstreifenzirren sowie Emissionen wie Stickoxide (NO_x), Wasserdampf, Ruß, Sulfat- und andere Aerosolpartikel zur Klimawirkung der Luftfahrt bei.

2019 gab es global ca. 47 Mio. Flüge, was einen Anstieg von 26 % im Vergleich zu 2014 bedeutet. Wenn vor Ausbruch der Coronapandemie erstellte Prognosen herangezogen werden, steht dabei der eigentlich entscheidende Anstieg der Flugzahlen noch bevor, mit sehr starken Wachstumsraten bis hin zu einer Verdreifung zwischen 2020 und 2050.

Vor diesem Hintergrund kommt technischen Innovationen zur klimaneutralen Gestaltung des Luftverkehrs eine sehr wichtige Rolle zu. Hierzu zählen insbesondere nachhaltige Kraftstoffe und Antriebskonzepte, etwa auf Basis von grünem Wasserstoff wie sogenannte E-Fuels. Ihr technischer Entwicklungsstand, ihr Klimaschutzpotenzial sowie zusammenhängende Fragen und Herausforderungen werden hier dargestellt.

Hintergrund und Entwicklungsstand

Technologische Innovationen zur klimaneutralen Gestaltung des Luftverkehrs werden bereits seit Langem beforscht und entwickelt. Aufgrund der sich zuspitzenden Klimakrise steigt der Handlungsdruck, neben der Energiewende nun auch die Dekarbonisierung des Verkehrssektors und anderer gesellschaftlicher Bereiche konsequent auf den Weg zu bringen. Entsprechend verfolgen verschiedene Akteure in Politik, Luftfahrtindustrie und -forschung das Ansinnen, auf Basis einer gesamtheitlichen Technologieanalyse und -folgenabschätzung wichtige Weichen für die nachhaltige Transformation des Luftverkehrs zu stellen.

Beitrag des Luftverkehrs zum Klimawandel

Das Pariser Klimaschutzabkommen sieht vor, die globale Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Deutschland gibt sich in seinem Klimaschutzgesetz entsprechend das Ziel, bis 2045 Nettoklimaneutralität zu erreichen. Hierfür müssen im Verkehrssektor bereits bis 2030 die CO₂-Äquivalente von 150 auf 85 Mio. t gesenkt werden (BMUV 2021). Um diese Klimaziele auf deutscher und globaler Ebene zu erreichen, ist ein substanzieller Beitrag des Luftverkehrs notwendig. Denn global betrachtet liegt sein Anteil an der anthropogenen Klimaerwärmung bei 3,5 % (Lee et al. 2021). Aufgrund des starken weltweiten Wachstums des Luftverkehrs ist davon auszugehen, dass dieser Anteil weiter zunehmen wird. Zusätzlich zum ausgestoßenen CO₂, das für lediglich ca. ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs verantwortlich ist, spielen sogenannte Nicht-CO₂-Effekte eine sehr bedeutende Rolle. Dazu zählen insbesondere Kondensstreifen und daraus resultierende Kondensstreifenzirren sowie Emissionen wie Stickoxide (NO_x), Wasserdampf, Ruß, Sulfat- und andere Aerosolpartikel. Ihre Klimawirkung wird

insgesamt als doppelt so hoch wie die des ausgestoßenen CO₂ veranschlagt (Lee et al. 2021). Dies ist besonders kritisch, da häufig moniert wird, dass Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs einen blinden Fleck der internationalen und nationalen Klimapolitik darstellen (Bopst et al. 2020; Gössling/Humpe 2020).

2018 hat der von Deutschland ausgehende Luftverkehr ca. 32 Mio. t CO₂ verursacht. Rechnet man die Nicht-CO₂-Effekte dazu, so ergibt sich eine Klimawirkung in etwa der Größenordnung des gesamten jährlichen innerdeutschen Pkw-Verkehrs (BUND 2020). Die in Deutschland getankte Kerosinmenge hat sich zwischen 1990 und 2017 mehr als verdoppelt und stieg weltweit in diesem Zeitraum um 73%. Es wird erwartet, dass bis 2050 global etwa zwei- bis viermal so viel Kerosin benötigt werden könnte wie heute (Bopst et al. 2020).

Im Zuge der Globalisierung ist die Luftverkehrsbranche stark gewachsen. Seit Ende der 1970er Jahre hat sich die Nachfrage nach Flugreisen vervierfacht, was einem Branchenwachstum von ca. 5% pro Jahr entspricht (Wilke et al. 2016). Auch in den Jahren vor der Coronapandemie ist die Anzahl der Flüge in Deutschland und weltweit – kontinuierlich und stark gestiegen. 2019 gab es global ca. 47 Mio. Flüge (Statista 2021), was einen Anstieg von 26% im Vergleich zu 2014 bedeutet. Noch entscheidender: Vor Ausbruch der Coronapandemie gingen Vorhersagen davon aus, dass ein weitaus größerer Anstieg des Verkehrsaufkommens erst noch bevorsteht. Basierend auf Einschätzungen der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation der Vereinten Nationen (ICAO) aus dem Jahr 2016 wurde eine Zunahme bis hin zu einer Verdreifachung zwischen 2020 und 2050 prognostiziert (Gössling/Humpe 2020). Zwar ist der Luftverkehr im Zuge der Coronapandemie deutlich zurückgegangen, doch aktuelle Befragungen und Einschätzungen von Branchenexpert/innen halten eine rasche Rückkehr zum Vorkrisenniveau für realistisch (Gössling/Humpe 2020; Hader et al. 2021).



Vor diesem Hintergrund kommt technischen Innovationen neben regulativen und ökonomischen Instrumenten eine sehr wichtige Rolle bei der klimaneutralen Gestaltung des Luftverkehrs zu. Als technologische Vision wird das emissionsfreie Flugzeug angestrebt, das weder Klimawirkungen verursacht noch sonstige Schadstoffe emittiert (DLR/BDLI 2020).

Expert/innen gehen dementsprechend davon aus, dass der notwendige Klimaschutzbeitrag des Luftverkehrs nur mit einer grundlegenden Wende hin zu alternativen Antrieben erreichbar sein wird. Die bloße Fortsetzung der in der Vergangenheit vollzogenen Effizienzsteigerungen ist hierfür nicht ausreichend. Zwar wurde zwischen 1960 und 2014 eine jährliche Effizienzsteigerung des Kraftstoffverbrauchs pro Personenkilometer von durchschnittlich 1,3% erzielt, die insbesondere auf kontinuierlich verbesserte Antriebssysteme, Aerodynamik und Gewichtsreduzierung zurückzuführen ist. Die zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendige weitere Reduktion von CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten wäre – zumal angesichts der erwarteten Zunahme der Passagierzahlen – allein damit nicht möglich (Grewe et al. 2021).

Diese Erkenntnis drückt sich in zahlreichen aktuellen Strategiepapieren und Branchenroadmaps aus, die nachhaltige Flugkraftstoffe und Antriebskonzepte als zentrale Entwicklungsfelder beschreiben, um einen möglichst klimaneutralen Luftverkehr bis 2050 zu erreichen (ACARE 2020; aireg 2020; BDLI 2020; DLR/BDLI 2020; IATA 2021). Dabei fokussieren diese Darstellungen in besonderem Maße auf nachhaltige Flugkraftstoffe, wie E-Fuels/Power to Liquid, sowie direkte Nutzungskonzepte für Wasserstoff als Kraftstoff sowie (hybrid)elektrisches Fliegen, betrieben durch Batterien oder Brennstoffzellen.

Auf übergeordneter Ebene wird in den Strategiepapieren zudem häufig die Forderung an die Politik und alle weiteren involvierten Akteure formuliert, anzuerkennen, dass der Weg zu einem klimaneutralen Luftverkehr einen grundlegenden Technologiewechsel in zahlreichen Bereichen sowie eine disziplinübergreifende Bewertung des Gesamtsystems Luftverkehr erfordert (ACARE 2020; DLR/BDLI 2020).

Nachhaltige Kraftstoffe wie Power to Liquid und Biokerosin

Im Mittelpunkt der Diskussion um nachhaltige Flugkraftstoffe oder SAF (Sustainable Aviation Fuels) stehen E-Fuels oder Power to Liquid (PtL). E-Fuels sind drop-in-fähig¹, d.h., sie ähneln fossilem Kerosin in seinen Eigen-

1 Neben Drop-in-Kraftstoffen werden Near-drop-in- und Non-drop-in-Kraftstoffe unterschieden. Near-drop-in-Kraftstoffe setzen eine moderate technische Anpassung etwa an Betankungsinfrastruktur und Antriebssystemen voraus, wohingegen Non-drop-in-Kraftstoffe grundsätzlich neue Antriebstechniken voraussetzen (NOW GmbH 2021).

schaften und können diesem in beliebigem Verhältnis beigemischt werden. Für ihre Herstellung wird Wasser durch Elektrolyse in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt, der mit Kohlendioxid entweder im Fischer-Tropsch-Verfahren oder durch Methanolsynthese zu Rohkraftstoff synthetisiert und beispielsweise zu E- oder PtL-Kerosin veredelt wird (Bundesregierung 2021; Scheid 2020). Um einen Beitrag zur Klimaneutralität zu leisten, ist es notwendig, dass die eingesetzte Prozessenergie (im wesentlichen Strom) erneuerbar erzeugt (und somit „grüner“ Wasserstoff² verwendet) und das Kohlendioxid aus der Luft gefiltert wird bzw. anderweitig einen CO₂-Kreislauf in der Atmosphäre ermöglicht. Nach aktueller Studienlage kann solches E-Kerosin bei einer Beimischungsquote von 50% bereits zu einer Einsparung von 40% der CO₂-Emissionen führen (DLR/BDLI 2020). Insofern das für das E-Kerosin verwendete CO₂ per Ausfilterung aus der Luft gewonnen werden kann, halten Expert/innen zudem eine Gesamteinsparung von bis zu 100% (netto) für möglich, wie in der Abbildung dargestellt (McKinsey 2020).

Voraussetzung für einen großflächigeren Einsatz ist die Verfügbarkeit großer Mengen erneuerbar erzeugten Stroms bzw. von grünem Wasserstoff. Um einen wirtschaftlichen Betrieb von PtL-Anlagen zu gewährleisten, muss dieser erneuerbar erzeugte Strom preiswert sowie kontinuierlich zur Verfügung stehen. Das heißt, PtL-Anlagen benötigen eigene Erneuerbare-Energien-Anlagen für einen Volllastbetrieb und können nicht ausschließlich mit Überschussstrom versorgt werden (Agora Verkehrswende et al. 2018). Grundsätzlich ist von einer starken Sektor-konkurrenz um erneuerbaren Strom bzw. nachhaltig produzierten Wasserstoff auszugehen. Eine weitere Herausforderung ist der Aufbau entsprechender PtL-Produktionskapazitäten in industriellem Maßstab. Diese sind aktuell weltweit nur sehr eingeschränkt vorhanden. In Deutschland besteht bislang nur eine im Jahr 2021 eröffnete Produktionsanlage von E-Kerosin in industriellem Maßstab (atmosfair 2021). Einzelne technologische Komponenten der Wertschöpfungskette, wie beispielsweise die großskalige Direktabscheidung von Kohlendioxid aus der Luft (Direct Air Capture), sind noch weit von der industriell nutz-

baren technologischen Reife entfernt. Zudem haben sie einen großen Energiebedarf, der ebenfalls aus erneuerbaren Quellen zu decken ist (Bundesregierung 2021). Sollte der PtL-Anteil an Flugkraftstoffen über 50% steigen, ist davon auszugehen, dass auch technische Anpassungen an bestehenden Antriebssystemen vorzunehmen sind (Bundesregierung 2021). Als Near-drop-in-Kraftstoffe werden zudem Weiterentwicklungen von E-Kerosin erforscht, die das Potenzial haben sollen, die Ruß- und Partikelemissionen um bis zu 90% und die NO_x-Emissionen³ um nahezu 100% reduzieren zu können (DLR/BDLI 2020).

Ein weiterer Ansatz für klimaneutrale drop-in-fähige Flugkraftstoffe ist die Nutzung von Biokerosin, welches aus nicht fossilen CO₂-neutralen Ressourcen gewonnen wird. Beispielsweise unterstützt die Europäische Kommission (EK 2020) mit ihrer Gesetzesinitiative „ReFuelEU“, dass solche Flugzeugtreibstoffe langfristig als Alternative zur Verfügung stehen. Zur Herstellung von Biokerosin können etwa organische Abfälle aus der Lebensmittelindustrie (z.B. Speiseöl) oder Holzreste verwendet werden, wodurch eine Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion vermieden wird. In Einzelfällen wird derart gewonnenes Biokerosin bereits eingesetzt. Allerdings ist insbesondere die Verfügbarkeit entsprechender Reststoffe für eine größere Skalierung derzeit, ob im europäischen oder im globalen Maßstab, nicht gegeben und wird auch langfristig infrage gestellt (Bopst et al. 2019). Konventionelle Biokraftstoffe auf Basis etwa von Palmöl, Jatropha oder Zuckerrohr sollen durch „ReFuelEU“ nicht gefördert werden. Sie werden mittlerweile aufgrund ihrer negativen Klimabilanz und der Flächenkonkurrenz mit dem Nahrungsmittelanbau grundsätzlich als nicht nachhaltig und damit nicht zukunftsfähig angesehen (Scheid 2020). Moderne Produktionsverfahren, die beispielsweise Algen verwenden, weisen wiederum derzeit noch erhebliche Defizite hinsichtlich ihrer technologischen bzw. ökonomischen Reife auf (TAB 2019).

Neue Antriebskonzepte

Neben drop-in-fähigen PtL-Kraftstoffen und Biokerosin wird wasserstoffbasierten sowie voll- und hybridelektrischen Antrieben großes Potenzial zugeschrieben, den Luftverkehr zu einer weitgehenden Klimaneutralität zu führen und CO₂-Emissionen sowie Nicht-CO₂-Effekte deutlich zu reduzieren (aireg 2020).

Wasserstoff kann zum einen direkt in modifizierten Gasturbinenriebwerken verbrannt werden. Aufgrund seiner hohen Energiedichte bietet sich diese Lösung zukünftig für den Einsatz auf Lang- und Mittelstrecken an (BDLI 2020). Zum anderen kann Wasserstoff in Brennstoffzel-

2 Wasserstoff wird als „grün“ bezeichnet, insofern der Strom für die Elektrolyse aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. „Blauer“ Wasserstoff wird dagegen aus Kohlenwasserstoffen (vor allem aus Erdgas) hergestellt, wobei CO₂ entsteht. Das CO₂ wird abgefangen und unterirdisch gelagert (Carbon Capture and Storage – CCS). „Grauer“ Wasserstoff wird ebenfalls aus fossilen Energiequellen wie Erdgas gewonnen. Dabei wird das CO₂ jedoch nicht abgefangen. Bei der Produktion 1 t Wasserstoff entstehen so ca. 10 t CO₂. „Türkiser“ Wasserstoff hingegen wird durch thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt. Anstelle von CO₂ entsteht dabei neben Wasserstoff fester Kohlenstoff. Bei der Herstellung von türkischem Wasserstoff muss deshalb kein gasförmiges Kohlendioxid unterirdisch gespeichert werden. Voraussetzungen für die CO₂-Neutralität des Verfahrens sind die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus erneuerbaren Energiequellen und eine dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs (BMW 2020).

3 Auch wenn zahlreiche Quellen PtL-Kraftstoffen ein signifikantes Potenzial zur Einsparung von NO_x-Emissionen zuschreiben (Thomson et al. 2020), gibt es auch gegenteilige bzw. zurückhaltendere Annahmen (McKinsey 2020).

len in elektrischen Strom umgewandelt werden, wodurch Flugzeuge (hybrid)elektrisch betrieben werden können. Eine gemeinsame Herausforderung für Forschung und Entwicklung hierbei ist die Speicherung des Wasserstoffs an Bord, die in der Regel stark gekühlt bei ca. -250°C erfolgen muss und daher viel Energie und verstärkte Isolierungen benötigt. Zudem werden größere Tanks als für herkömmliches Flugkerosin benötigt, für die an Bord Platz geschaffen werden muss, beispielsweise durch völlig neue Konstruktionsweisen von Flugzeug und Flügel (aireg 2020). Weitere technologische Herausforderungen bestehen etwa in der Entwicklung leichter Tanks und leistungsfähigerer Brennstoffzellen (NWR 2021). Ebenso benötigen wasserstoffbasierte Antriebskonzepte auch eine veränderte Infrastruktur, z.B. um einen Wasserstofftransport zu den Flughäfen und eine Bereitstellung auf dem Flughafengelände zu ermöglichen (aireg 2020). Vor dem Hintergrund der großen Bedeutung von Wasserstoff für die Umsetzung der Energiewende könnte zudem die Verfügbarkeit eine große Herausforderung darstellen, da die Konkurrenz anderer Sektoren, wie der Metall- oder der chemischen Industrie, um diesen Rohstoff groß sein wird.

Die Verbrennung von Wasserstoff erzeugt keine direkten Emissionen von CO_2 , Rußpartikeln oder Aerosolvorfäulern (DLR/BDLI 2020). Handelt es sich dabei um grünen, also auf Basis regenerativer Energien hergestellten Wasserstoff, kann der komplette Prozess weitestgehend CO_2 -neutral gestaltet werden. Dies ist von besonderer Bedeutung, da der Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff zukünftig vor allem für Mittel- und Langstreckenflüge vorgesehen ist, die für einen überproportional großen Anteil der CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs insgesamt verantwortlich sind. Im Gebiet der europäischen Flugsicherung Eurocontrol machen derartige Flüge mit Strecken von über 1.500 km etwa nur knapp 25 % aller Flüge aus, verursachen aber über drei Viertel aller CO_2 -Emissionen (NWR 2021). In neuen Studien wird zudem davon ausgegangen, dass unter der zusätzlichen Berücksichtigung von Nicht- CO_2 -Emissionen die Wasserstoffdirektverbrennung die Klimaauswirkungen im Flug insgesamt um 50 bis 75 % reduzieren kann. Durch einen mit den Turbinen gekoppelten Brennstoffzellenantrieb könnten zudem weitere Effizienzgewinne erzielt werden (McKinsey 2020). Allerdings bestehen hinsichtlich der möglichen Klimawirkungen des in großen Mengen emittierten Wasserdampfes – auch in Abhängigkeit von unterschiedlichen Flughöhen – noch erhebliche Wissenslücken (NWR 2021). NO_x -Emissionen treten weiterhin auf. Expert/innen schätzen jedoch, dass durch fortentwickelte Turbinen diese im Vergleich zum Gebrauch von fossilem Kerosin signifikant gesenkt werden können, auch wenn hier noch deutlicher Entwicklungsbedarf besteht (McKinsey 2020, NWR 2021)

Für das Fliegen mit batterieelektrischen oder brennstoffzellen(hybrid)elektrischen Antrieben werden Gasturbinen und Kerosin durch Elektromotoren und Batteriespeicher

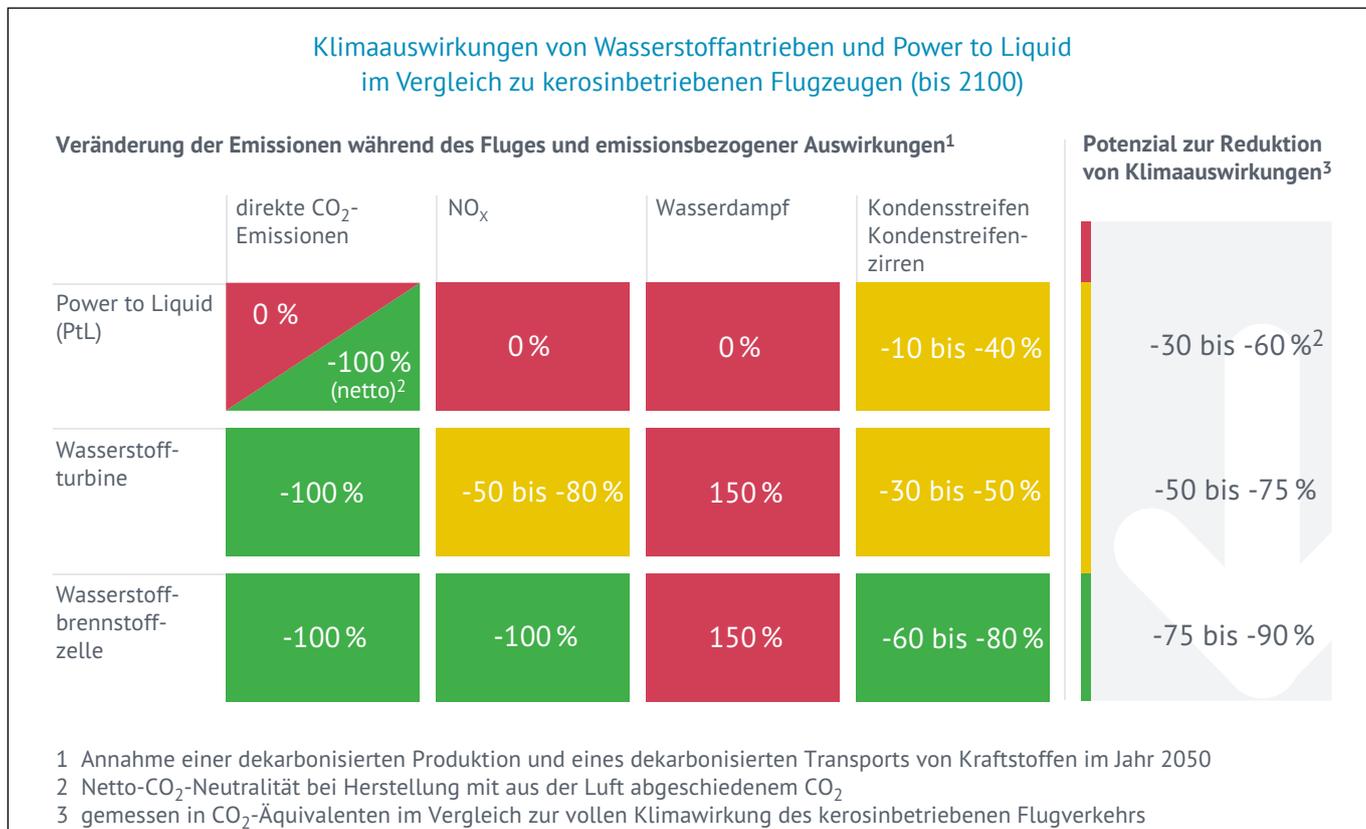
bzw. Brennstoffzellen ersetzt. Zwar besteht bei elektrischen Antriebssystemen eine hohe Gesamteffizienz. Zentrale technische Herausforderungen sind jedoch die geringe Energiedichte und das hohe Gewicht der Energiespeicher. Im Verhältnis zu Kerosin ist die Energiedichte aktuell verfügbarer Stromspeicher um den Faktor 25 geringer. Das heißt, es können lediglich ca. 230 Wh/kg gespeichert werden gegenüber ca. 11.900 Wh/kg bei Kerosin. Demnach bedarf es derzeit noch sehr großer und schwerer Stromspeicher, um ausreichend elektrische Energie an Bord mitzuführen, was die Flugzeuggröße und Flugreichweite entsprechend einschränkt (aireg 2020; DLR/BDLI 2020). Das elektrische Fliegen mit Batterien kommt nach Einschätzungen von Expert/innen daher vor allem für spezielle Kurz- und Regionalstrecken, etwa in Ballungsräumen, als Zubringer zu größeren Verkehrsknoten oder in speziellen Gebieten wie zerklüfteten Landschaften ohne alternative Bahnanbindung infrage (Hiller 2021). Ebenso eignet es sich für neuartige Anwendungen wie Flugtaxi und Lieferdrohnen sowie Kleinflugzeuge. Für Mittelstrecken sind ggf. Hybridkonzepte denkbar, etwa zur Abpufferung von Leistungsspitzen beim Start unter Nutzung der zuvor dargestellten nachhaltigen Treibstoffe. Für das vollelektrische Fliegen auf der Mittelstrecke gilt die absehbar erreichbare Energiedichte der Batterien als zu gering und deren Gewicht als zu hoch (BDLI 2020). Entsprechend wird eine darüber hinausgehende deutliche Umwälzung des Luftverkehrs, getrieben durch batterieelektrisches Fliegen, als eher spekulativ eingeschätzt (Jetzke 2017). In einer aktuellen Szenariostudie von Climact und dem New Climate Institute (Martin et al. 2020) im Auftrag von Greenpeace wird daher angenommen, dass im Jahr 2050 nur noch ca. 10 % des Luftverkehrs batterieelektrisch angetrieben sein werden.

Elektrisches Fliegen mit Brennstoffzellen oder Batterien vermeidet Ruß sowie direkte NO_x -, SO_x - und CO_2 -Emissionen komplett. Brennstoffzellen erzeugen ausschließlich Wasser bzw. Wasserdampf als Abgas, was zur Bildung von Kondensstreifen führen kann (DLR/BDLI 2020). Aufgrund der relativ großen Mengen an emittiertem Wasserdampf (Abb. 1) – bei gleichzeitig moderaten Temperaturen dieser Emissionen – könnte es sogar zu einer stärkeren Kondensstreifenbildung kommen im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Langlebigkeit und damit die Klimawirkung von Kondensstreifen, die durch Brennstoffzellenantriebe verursacht werden, geringer ausfallen als bei Kerosinantrieben, da kein Ruß als Kondensationskeim ausgestoßen wird (DLR 2021b). Die Zusammenhänge sind aber komplex und noch nicht ausreichend erforscht, um belastbare Aussagen zu treffen. Für einen signifikanten Beitrag zur Klimaneutralität ist auch hier der Einsatz von erneuerbar erzeugtem Strom bzw. grünem Wasserstoff notwendig.

Es wird deutlich, dass nicht nur CO_2 -Effekte, sondern auch Nicht- CO_2 -Effekte im Zusammenhang mit dem Einsatz von

SAFs bzw. neuen Antriebskonzepten in den Blick genommen werden müssen. Hinzu kommen die Klimawirkungen der gesamten Wertschöpfungsketten und der zusammenhängenden Infrastruktursysteme über den gesamten Lebenszyklus der neuen Technologien. Um das tatsächliche Potenzial zur Einsparung von Treibhausgasen sowie hinsichtlich weiterer Aspekte ökologischer Nachhaltigkeit

komplexen Wechselwirkungen beispielsweise mit Zulieferbranchen nicht verifiziert werden (Statista 2019; Wilke et al. 2016). Zu den direkt Beschäftigten zählen vor allem die Mitarbeitenden bei den Fluggesellschaften, an Flughäfen und bei Herstellern. Hinzu kommen Beschäftigte bei Bodenverkehrsunternehmen, bei der Flugsicherung, in der Luftfahrtverwaltung oder in Sicherheitsunternehmen.



Quelle: nach McKinsey 2020

von SAF und neuen Antriebskonzepten im Ganzen bewerten zu können, bedarf es neuer bzw. angepasster Methoden zur Erhebung und Aggregation von Umweltwirkungen sowie – darauf aufbauend – einheitlicher Nachhaltigkeitskriterien (DLR/BDLI 2020).

Gesellschaftliche und politische Relevanz

Der Luftverkehr ist ein wichtiger Wirtschaftsfaktor in Deutschland. 2017 bot die Branche ca. 330.000⁴ direkt Beschäftigten einen Arbeitsplatz (Statista 2019). Die Anzahl indirekt Beschäftigter und induzierter Arbeitsplätze wird auf bis zu 500.000 geschätzt. Allerdings unterliegt diese Schätzung einigen Unsicherheiten⁵ und kann aufgrund der

Indirekte Beschäftigungseffekte entstehen bei Drittunternehmen durch die Bestellung von Gütern oder Dienstleistungen durch Unternehmen aus der Luftverkehrsbranche. Induzierte Beschäftigungseffekte entstehen durch sämtliche Konsumausgaben direkt und indirekt Beschäftigter (Wilke et al. 2016). Des Weiteren tragen Tourist/innen, die mit dem Flugzeug nach Deutschland reisen, mit ihrer Kaufkraft zur inländischen Wertschöpfung bei. Aufgrund der Exportorientierung und der globalen Vernetzung der deutschen Wirtschaft bildet der Luftverkehr zudem ein wichtiges Element der logistischen Verbindung mit zentralen Zuliefer- und Absatzmärkten. Analog zum Umbruch in der Automobilindustrie und der Diskussion um die Zukunft der deutschen Autozulieferer in Zeiten der Elektromobilität stellt sich die Frage, inwiefern durch einen verstärkten Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe und Antriebe zukünftig größere Veränderungen der Beschäftigungszahlen bzw.

4 Die langfristigen Veränderungen der Beschäftigtenzahlen aufgrund der Folgen der Coronapandemie sind schwer absehbar. Schätzungen gehen von über 60.000 gefährdeten Arbeitsplätzen in der Branche aus (Sonnenburg 2020).
 5 Kritisiert wird u.a., dass beispielsweise nicht festgestellt werden kann, wie viele neue Arbeitsplätze durch den Bau eines Flughafens

geschaffen werden oder ob diese lediglich verlagert werden. Ebenfalls ist der Einfluss oder das Zusammenspiel mit anderen Branchen sehr komplex, da etwa Zulieferer häufig für verschiedene Branchen arbeiten (Wilke et al. 2016).

des Beschäftigungspotenzials zu erwarten sind und wie – etwa durch entsprechendes forschungs- und verkehrspolitisches Handeln – sowohl die Wertschöpfung als auch die Technologiesouveränität in dieser strategischen Branche gesichert werden können.

Zur Erreichung der eigenen klimapolitischen Ziele sowie zum Erhalt der internationalen Glaubwürdigkeit als Advokat für Klima- und Umweltschutz wäre es wichtig, den Umbau der deutschen und europäischen Luftfahrtbranche in Richtung Klimaneutralität konsequent zu unterstützen und auf diese Weise – analog zur deutschen Energiewende – einen deutlichen Impuls für eine globale Luftverkehrswende zu leisten.

Entsprechend wären auch die bestehenden technologie- und klimapolitischen Instrumente zu evaluieren, beispielsweise hinsichtlich der Entwicklung technologischer Optionen zur Reduzierung und Vermeidung von Nicht-CO₂-Effekten. So schätzen Expert/innen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR 2021a) die Maßnahmen im Rahmen der internationalen CORSIA-Initiative⁶ und des europäischen Emissionshandels als ungenügend ein, um das 1,5-°C-Ziel von Paris ausreichend zu unterstützen, da Nicht-CO₂-Effekte nicht berücksichtigt werden.

Das vorliegende Themenkurzprofil legt den Fokus auf nachhaltige Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte, deren Entwicklungsstand und damit zusammenhängende Herausforderungen. Mit Blick auf eine erfolgreiche Einführung dieser neuen Technologien und Kraftstoffe muss eine systemische, d.h. disziplinübergreifende Perspektive auf den klimaneutralen Luftverkehr eingenommen werden, die neben den hier beleuchteten Aspekten nachhaltiger Kraftstoffe und Antriebskonzepte etwa auch Belange des Designs und der Materialforschung, der Digitalisierung oder der Klimaforschung betreffen (DLR/BDLI 2020). Zudem sind auch logistische und infrastrukturelle Faktoren einzubeziehen, wie beispielsweise Szenarien zur zukünftigen Gestaltung des Energiesystems, welches große Mengen an erneuerbarem Strom bzw. grünem Wasserstoff für den Luftverkehr zur Verfügung stellen muss. Es ist wichtig, das Zusammenspiel all dieser Faktoren zu erfassen und Entwicklungs- und Investitionsbedarfe, Fort-



schritte und limitierende Faktoren im Ganzen im Blick zu behalten.

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Aufgrund der erheblichen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Relevanz auf nationaler wie globaler Ebene erscheint eine vertiefte Bearbeitung des Themenbereichs klimaneutraler Luftverkehr lohnenswert. Die Vielzahl der aktuell vorliegenden Strategie- und Positionspapiere, Weißbücher und Technologieroadmaps stimmt darin überein, dass ohne die dargestellten nachhaltigen Kraftstoffe und Antriebskonzepte die Gestaltung eines klimaneutralen Luftverkehrs nicht möglich sein wird. Dabei wird vielfacher grundlegender Forschungs-, Entwicklungs- und Umsetzungsbedarf beschrieben, womit deutlich wird, dass signifikante Unsicherheiten und Risiken hinsichtlich der Erreichung der Klimaschutzziele für den Luftverkehr bestehen. Trotz dieser Unsicherheiten besteht die Herausforderung, dass aufgrund der langfristigen Entwicklungszyklen im Luftverkehr bereits heute die forschungs- und innovationspolitischen Weichen so gestellt werden müssen, dass in den nächsten 30 Jahren eine Klimaneutralität des Flugverkehrs erreicht werden kann. Im Rahmen einer Kurzstudie kann ein kompakter Überblick erarbeitet werden, in welchen der genannten Themenbereichen bereits wesentliche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben betrieben werden. Außerdem können Wissenslücken und Forschungsbedarfe identifiziert werden, die zur Realisierung der Klimaziele des Luftverkehrs noch adressiert werden müssen.

⁶ Das „Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation“ (CORSIA) ist ein CO₂-Kompensationssystem der UN-Luftfahrtorganisation ICAO. Es ermöglicht die Kompensation von CO₂-Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr, der nicht durch nationale Klimaschutzziele abgedeckt ist, durch Erwerb von Gutscheinen aus Klimaschutzprojekten in anderen Sektoren und durch Zertifikate aus bestehenden Emissionshandelssystemen. Zusätzlich sollen Flugzeuge effizienter werden, Flugrouten optimiert und nach und nach alternative Treibstoffe (darunter versteht die ICAO synthetisch hergestellte Treibstoffe, aber auch Biokraftstoffe und bessere konventionelle Kraftstoffe) eingeführt werden. Zentrales Ziel ist das CO₂-neutrale Wachstum der internationalen Luftfahrt ab 2020 (Bopst et al. 2020).

Literatur

- ▶ ACARE (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe) (2020): Time for change. The need to rethink Europe's FlightPath 2050. https://acare4europe.org/sites/acare4europe.org/files/Time_for_change_FlightPath_2050.pdf (24.2.2022)
- ▶ Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. https://www.agora-energie.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf (24.2.2022)
- ▶ Aireg (Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.) (2020): Nachhaltige Flugkraftstoffe – Status, Optionen, Handlungsnotwendigkeiten. aireg Roadmap zur Markteinführung von Sustainable Aviation Fuels. (Bullerdiek, N.; Neuling, U.; Kaltschmitt, M.) Berlin, <https://aireg.de/download/nachhaltige-flugkraftstoffe-status-optionen-handlungsnotwendigkeiten/#> (24.2.2022)
- ▶ atmosfair (2021): atmosfair weiht weltweit erste Anlage zur Produktion von CO₂-neutralem synthetischen Kerosin im Emsland ein. Pressemitteilung, 4.10.2021, https://fairfuel.atmosfair.de/wp-content/uploads/2021/10/PM_E-Kerosin_DE.pdf (24.2.2022)
- ▶ BDLI (Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.) (2020): Nachhaltige und klimaneutrale Luftfahrt aus Deutschland für die Energiewende am Himmel. Berlin, https://www.bdli.de/sites/default/files/2020-09/TechStrategie_2020_3.pdf (24.2.2022)
- ▶ BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2021): Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_3_bf.pdf (24.2.2022)
- ▶ BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2020): Was ist eigentlich grüner Wasserstoff? <https://www.bmwi-energie.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/07/Meldung/direkt-erklaert.html> (24.2.2022)
- ▶ Bopst, J.; Herbener, R.; Hölzer-Schopohl, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Weiß, J. (2019): Umweltschonender Luftverkehr. lokal – national – international. UBA (Hg.), Texte 130/2019, Dessau-Rosslau
- ▶ Bopst, J.; Hölzer-Schopohl, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Schmied, M.; Weiß, J. (2020): Wohin geht die Reise? Luftverkehr der Zukunft: umwelt- und klimaschonend, treibhausgasneutral, lärmarm. UBA (Hg.), Dessau-Rosslau
- ▶ BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.) (2020): Weniger ist mehr! Sieben Schritte für einen klima- und ressourcenschonenden Luftverkehr, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/mobilitaet_sieben_schritte_luftverkehr.pdf (24.2.2022)
- ▶ Bundesregierung (2021): PtL-Roadmap. Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. https://www.bdli.de/sites/default/files/2021-05/210507_PtL-Roadmap_f.pdf (24.2.2022)
- ▶ DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2021a): Aktuelle Klimaziele der Luftfahrt zu gering für Trendwende. https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/02/20210622_aktuelle-klimaziele-der-luftfahrt-zu-gering-fuer-trendwende.html (24.2.2022)
- ▶ DLR (2021b): Kondensstreifenbildung bei Flugzeugen mit Brennstoffzellenantrieb. https://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725_read-74330/6/6725_page-1/ (24.2.2022)
- ▶ DLR; BDLI (2020): Zero Emission Aviation – Emissionsfreie Luftfahrt. Whitepaper der deutschen Luftfahrtforschung, https://www.dlr.de/content/de/downloads/2020/white-paper-zero-emission-aviation.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (18.1.2022)
- ▶ EK (Europäische Kommission) (2020): Nachhaltige Flugzeugtreibstoffe – ReFuelEU Aviation. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Nachhaltige-Flugzeugtreibstoffe-ReFuelEU-Aviation_de (24.2.2022)
- ▶ Gössling, S.; Humpe, A.(2020): The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. In: Global Environmental Change 65(1), Artikel 102194
- ▶ Grewe, V.; Gangoli Rao, A.; Grönstedt, T.; Xisto, C.; Linke, F.; Melkert, J.; Middel, J.; Ohlenforst, B.; Blakey, S.; Christie, S.; Matthes, S.; Dahlmann, K (2021): Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. In: Nature communications 12, Artikel 3841
- ▶ Hader, M.; Thomson, R.; de Silva, N. (2021): Ein Jahr Corona in den Branchen Luftverkehr und Raumfahrt. Mögliche Erholungsszenarien, aktuelle Gedanken und Meinungen in der Branche und wichtige aufkommende Trends. Roland Berger, 14.6.2021, <https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Ein-Jahr-Corona-in-den-Branchen-Luftverkehr-und-Raumfahrt.html> (24.2.2022)
- ▶ Hiller, S. (2021): Norwegische Regionalairline will ab 2026 als erstes Elektroflugzeuge einsetzen. Energyload, 18.5.2021, <https://energyload.eu/elektromobilitaet/elektroflugzeug/norwegen-elektroflugzeug-2/> (24.2.2022)
- ▶ IATA (2021): Net-Zero Carbon Emissions by 2050. Pressemitteilung Nr. 66 vom 4.10.2021, <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/> (24.2.2022)
- ▶ Jetzke, T. (2017): Elektrisches Fliegen: Von der Drohne zum Passagierflugzeug. iit perspektive Nr. 33, Berlin
- ▶ Lee, D.; Fahey, D.; Skowron, A.; Allen, M.; Burkhardt, U.; Chen, Q.; Doherty, S.; Freeman, S.; Forster, P.; Fuglestedt, J.; Gettelman, A. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: Atmospheric Environment 244, Artikel 117834
- ▶ Martin, B.; Pestiaux, J.; Schobbens, Q.; Emmrich, J.; Hagemann, M. (2020): A radical transformation of mobility in Europe: Exploring the decarbonisation of the transport

sector by 2040. https://www.greenpeace.org/static/planet4-belgium-stateless/2020/09/6a3a7fc4-transporroadmap_report_september2020_2.pdf (24.2.2022)

- ▶ McKinsey & Company (2020): Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Clean Sky 2 JU and Fuel, Cells and Hydrogen 2 JU (Hg.), Luxemburg
- ▶ NOW GmbH (2021): Factsheet: Übersicht und Einordnung alternativer Kraftstoffe. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/11/Factsheet_alternative-Kraftstoffe_NOW-GmbH.pdf (24.2.2022)
- ▶ NWR (Nationaler Wasserstoffrat) (2021): Wasserstoff für die Luftfahrt in Deutschland. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/NWR_Stellungnahme_Luftfahrt.pdf (24.2.2022)
- ▶ Scheid, L. (2020): Auf dem Weg zum klimaneutralen Fliegen. Zeit online, 7.10.2020, <https://www.zeit.de/mobilitaet/2020-10/biokerosin-flugverkehr-green-deal-klimaschutz> (24.2.2022)
- ▶ Sonnenburg, A. (2020): Die Luftfahrt in der Corona-Krise – wo die direkten Folgen der Krise eintreten und welche Branchen es in zweiter Reihe trifft. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (Hg.), GWS-Kurzmitteilung 2020/08, Osnabrück
- ▶ Statista (2019): Anzahl der direkt, indirekt und induziert Beschäftigten der deutschen Luftfahrtindustrie im Jahr 2017. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1042715/umfrage/direkt-indirekt-und-induziert-von-der-deutschen-luftfahrt-geschaffene-arbeitsplaetze/> (19.11.2021)
- ▶ Statista (2021): Anzahl der Flüge in der weltweiten Luftfahrt von 2014 bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/411620/umfrage/anzahl-der-weltweiten-fluege/> (19.11.2021)

- ▶ TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2019): Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den Lkw-Verkehr. (Schröter-Schlaack, C.; Aicher, C.; Grünwald, R., Revermann, C.; Schiller, J.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 181, Berlin
- ▶ Thomson, R.; Sachdeva, N.; Healy, A.; Bailly, N.; Stern, C. (2020): Sustainable Aviation Fuels: The best Solution to large sustainable Aircraft? Roland Berger, London
- ▶ Wilke, P.; Schmid, K.; Gröning, S. (2016): Branchenanalyse Luftverkehr. Entwicklung von Beschäftigung und Arbeitsbedingungen. Study der Hans-Böckler-Stiftung 326, Düsseldorf

Das Horizon-Scanning ist Teil des methodischen Spektrums der Technikfolgenabschätzung im TAB.

Horizon
SCANNING

Mittels Horizon-Scanning werden neue technologische Entwicklungen beobachtet und diese systematisch auf ihre Chancen und Risiken bewertet. So werden technologische, ökonomische, ökologische, soziale und politische Veränderungspotenziale möglichst früh erfasst und beschrieben. Ziel des Horizon-Scannings ist es, einen Beitrag zur forschungs- und innovationspolitischen Orientierung und Meinungsbildung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zu leisten.

In der praktischen Umsetzung werden im Horizon-Scanning softwaregestützte Such- und Analyseschritte mit expertenbasierten Validierungs- und Bewertungsprozessen kombiniert.

Herausgeber: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Gestaltung und Redaktion: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Bildnachweise: © spoooh/iStock (S. 1); © lsannes/iStock (S. 3); © aapsky/iStock (S. 6)

ISSN-Internet: 2629-2874