



BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klima- verträglicheren Luftverkehr



Tobias Hungerland
Lia Meißner
Sebastian Abel
Lukas Nögel
Julia Czerniak-Wilmes



Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klima- verträglicheren Luftverkehr



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin
Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de

2024

Gestaltung: VDI/VDE-IT

Bildnachweise: Peterschreiber.media/Adobe Stock (Umschlagseite); spoooh/iStock (S. 21); izusek/iStock (S.25); mcKensa/iStock (S.33); Isannes/iStock (S.36); AzmanL/iStock (S.72); Chalabala/iStock (S.85); Louise Beaumont/iStock (S.93)

ISSN-Internet: 2702-7260

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	13
2 Aktuelle und künftige Entwicklungen des Luftverkehrs	17
2.1 Begriffsverständnis und Fokus der Folgenabschätzung	17
2.2 Die Klimawirkung der Luftfahrt	18
2.3 Zukünftige Entwicklungen der Luftfahrt	22
3 Politischer Rahmen	27
3.1 Bestandteile politischer Rahmenbedingungen	27
3.2 Politische Zielsetzungen und Strategien für eine klimaneutrale Luftfahrt	30
3.2.1 Aktivitäten der deutschen Bundesregierung	31
3.2.2 Aktivitäten der Europäischen Union	33
3.2.3 Internationale Aktivitäten	37
4 Innovationssystem der deutschen Luftfahrt	39
4.1 Technologieförderung der Luftfahrt in Deutschland	39
4.2 Hotspots der Luftfahrtindustrie in Deutschland: Zahlen und Fakten zu Beschäftigten und Schwerpunkten	41
4.3 Die wichtigsten Clusterinitiativen im Kontext klimaneutralen Fliegens im Überblick	42
5 Innovationsbereiche	45
5.1 Technologiemapping	45
5.1.1 Publikationsanalyse	45
5.1.2 Europäische Innovationsförderung	48
5.2 Innovative Kraftstoffe	53
5.2.1 Biokraftstoffe	54
5.2.2 E-Fuels	56
5.2.3 Wasserstoff	58
5.3 Innovative Antriebskonzepte	59
5.4 Weitere Innovationsbereiche	62



6	Klimaneutrale Luftfahrt in Deutschland	69
6.1	Technologiemix für die Zukunft	69
6.2	Treiber und Barrieren für eine klimaneutrale Luftfahrt	71
6.2.1	Gesellschaft	71
6.2.2	Wirtschaft	78
6.2.3	Umwelt	80
6.2.4	Politik	83
6.3	Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems	86
7	Handlungsfelder	91
7.1	Kurzfristig realisierbare Maßnahmen mit großer Wirkung	91
7.2	Mittel- und langfristige Weichenstellungen	93
8	Literatur	97
9	Anhang	111
9.1	Interviewpartner/innen, beteiligte Expert/innen	111
9.2	Abbildungen	111
9.3	Tabellen	112
9.4	Abkürzungen	112



Zusammenfassung

Ziele und Vorgehen

Die Kurzstudie „Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren Luftverkehr“ gibt einen Überblick über wesentliche technische Innovationsbereiche, die zu einer klimaverträglicheren Luftfahrt beitragen können. Im Fokus stehen die beiden Innovationsbereiche Kraftstoffe und Antriebskonzepte, die auf ihre Potenziale und Risiken hin analysiert werden. An geeigneten Stellen der Analyse werden auch weitere Ansätze, wie die Kompensation von Emissionen, die Steigerung der Effizienz sowie die Vermeidung von Flügen, auf ihre Potenziale für eine klimaneutrale Gestaltung der Luftfahrt betrachtet. Eine klimaverträglichere Luftfahrt ist – anders als eine klimaneutrale Luftfahrt – nicht auf einen absoluten Nullwert von CO₂- und Nicht-CO₂-Emissionen ausgerichtet.

Zunächst werden Begriffsverständnis und Analyserahmen sowie der Fokus der Technikfolgenabschätzung festgelegt. Das einleitende Kapitel umfasst auch eine Darstellung und einen Ausblick auf die zukünftige Entwicklung der Klimawirkung der weltweiten Luftfahrt. Als Hintergrund, vor dem die beiden genannten Hauptinnovationsbereiche sich künftig weiterentwickeln und gestaltet werden können, wird eine kurze Darstellung des politischen Rahmens, also der relevanten Zielsetzungen, Strategien, Maßnahmen sowie Regularien vorgenommen.

Maßgeblich für die Entwicklung von Innovationen ist das Innovationssystem der deutschen Luftfahrtindustrie mit seinen regionalen Schwerpunkten sowie die unterstützende Technologieförderung der Bundesregierung. Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit neuen Entwicklungen in den beiden zentralen Innovationsbereichen Kraftstoffe und Antriebskonzepte ist ein Technologiemapping, das auf Grundlage einer Publikations- und Förderdatenanalyse die Schwerpunkte in den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Deutschland und Europa ermittelt und deren wesentliche Merkmale skizziert. Da Kraftstoffe und Antriebskonzepte nicht allein zum Erreichen von Klimaneutralität in der Luftfahrt führen, werden weitere Innovationsbereiche der Luftfahrt behandelt.

Ein zentrales Ergebnis der Studie ist die Erkenntnis, dass ein Technologiemix notwendig erscheint, um die unterschiedlichen Potenziale der Innovationsbereiche erschließen zu können. Auf dieser Einsicht aufbauend, werden gesellschaftliche, wirtschaftliche, ökologische und politische Treiber und Barrieren im Umfeld der Luftfahrt erläutert. Anschließend erfolgt eine Analyse der Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems.

Abschließend werden die wesentlichen Handlungsfelder und -optionen aufgeführt, die sich politischen Entscheider/innen bieten, um durch Förderung der Treiber, Un-



terstützung der Stärken sowie Abbau von Barrieren und Ausgleich der Schwächen zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt beizutragen.

Aktuelle und künftige Entwicklungen des Luftverkehrs

Weltweit steigt die Zahl der Flugreisen an. Angesichts des weltweit wachsenden Flugverkehrs im Passagier- und Frachtbereich stellt das Erreichen von Klimaneutralität eine große Herausforderung dar. Hinzu kommen regional unterschiedliche Entwicklungen, sodass die größte Zunahme an Flügen in Weltregionen verortet ist, die weniger strenge Klimaziele verfolgen.

Die internationale Luftfahrt hat Schätzungen zufolge einen Anteil von ca. 3,5 bis 5 % an der anthropogenen Erwärmung. In Europa verursacht die Luftfahrt ca. 4 % der gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), in Deutschland werden ca. 3,4 % der gesamtdeutschen CO₂-Emissionen durch den internationalen Luftverkehr von und nach Deutschland und 0,33 % durch den inländischen Luftverkehr verursacht. Circa 1,5 % der gesamten seit 1940 durch Menschen verursachten CO₂-Emissionen sind auf die Luftfahrt zurückzuführen. Allerdings steht CO₂ nur für rund ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs. Die Nicht-CO₂-Effekte – Rußpartikel, Wasserdampf, Schwefel- und Stickoxide (NO_x), die zur Bildung von Kondensstreifen und Zirruswolken führen – spielen sogar eine weitaus bedeutendere Rolle, sind allerdings auch wissenschaftlich noch nicht in Gänze verstanden. Die Effekte von Kondensstreifen und Zirruswolken sind neben denen von CO₂ als am stärksten einzuschätzen. Die Klimawirkung variiert zudem in Abhängigkeit von den zurückgelegten Strecken, den Reise Flughöhen sowie den eingesetzten Flugzeugen.

Historisch betrachtet sind der Passagier- und Frachtluftverkehr kontinuierlich angestiegen. Dieser Trend wird sich höchstwahrscheinlich auch in den nächsten rund 25 Jahren fortsetzen. Ohne entsprechende Maßnahmen steigen damit einhergehend auch der Kerosinverbrauch und die schädliche Klimawirkung weiter an. 2050 könnten bereits 60 % mehr CO₂-Emissionen entstehen als noch 2019.

Politischer Rahmen

Der politisch-regulatorische Rahmen für die Reduzierung der Klimawirkung des Flugverkehrs setzt sich zusammen aus verschiedenen nationalen und europäischen Regelungen und Strategien sowie aus internationalen Verpflichtungen im Kontext der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization – ICAO) und der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC). Insbesondere gegenwärtige Aktivitäten auf europäischer Ebene, etwa die Verschärfung des Emissionshandels oder neue Anreize zur Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe, sind wichtige Treiber zur Weiterentwicklung dieses Rahmens. Dabei herrscht eine hohe Dynamik in der Dis-



kussion, welche Politikinstrumente und -ansätze am effektivsten zu einem möglichst klimaneutralen Flugverkehr führen können. Hierbei spielt eine wichtige Rolle, ob man primär den deutschen, den europäischen oder den internationalen Luftverkehr betrachtet. In diesem Zusammenhang wurde in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an forschungs- und wirtschaftspolitischen Strategie- und Positionspapieren, Weißbüchern sowie Technologieroadmaps zum Thema klimaneutrales Fliegen bzw. klimaneutraler Luftverkehr von politischer und wirtschaftlicher Seite sowie durch Thinktanks und Forschungseinrichtungen publiziert. Darin werden einerseits mögliche technologische Entwicklungspfade und andererseits verschiedene politische Strategien zur Erreichung eines möglichst klimaneutralen Luftverkehrs dargestellt.

Innovationssystem der deutschen Luftfahrt

Das Innovationssystem der Luftfahrt in Deutschland besteht aus einer Vielzahl national und international vernetzter Akteure. Ein wesentlicher Bestandteil für die Innovationsfähigkeit ist die Technologieförderung auf Bundes- und Landesebene. Im Zeitablauf hat sich ein vielfältiges Innovationsökosystem entwickelt, das alle Wertschöpfungsstufen und Technologiebereiche der Luftfahrt abdeckt. Eine besondere Rolle spielen dabei Clusterinitiativen, in denen Ausbildung/Qualifizierung, FuE-Aktivitäten sowie der Transfer von der Theorie in die Praxis vorangetrieben werden.

Zentrales Instrument zur Förderung von Forschungs- und Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt am Standort Deutschland ist das „Luftfahrtforschungsprogramm“ (LuFo) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Dessen Ziel ist, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie durch Technologieförderung zu stärken. Dem Thema Nachhaltigkeit und dem Einfluss auf den Klimaschutz wird bei der Auswahl der geförderten Projekte großes Gewicht beigemessen, und 2020 wurden erstmals konkrete Zielwerte des Programms für 2035 festgeschrieben. Die Analyse der Forschungsförderung von Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt allein des BMWK zeigt, dass sich das Niveau der Förderung von 2016 bis 2020 relativ konstant bei ca. 150 Mio. Euro befand und seit 2021 ein deutlicher Anstieg auf ca. 200 Mio. Euro zu verzeichnen ist. Zudem spielen die Bundesländer eine wichtige Rolle bei der Technologieförderung der Luftfahrt in Deutschland, da sie die regionale Wirtschafts- und Innovationspolitik gestalten und dadurch die Standortbedingungen für die Luftfahrtindustrie beeinflussen.

In den Regionen mit vielen Beschäftigten in der Luftfahrt in Deutschland gibt es mehrere relevante Clusterinitiativen, die regionale Akteure aus Industrie, Wissenschaft und Politik zusammenbringen und kooperative und technologieorientierte Projekte initiieren. Somit spielen Cluster eine wichtige Rolle dabei, insbesondere die kleinen und mittleren Unternehmen zu unterstützen, innovativ zu sein und neue technologische Entwicklungen im Bereich klimaverträglicheres Fliegen in neue Produkte und Dienstleistungen umzusetzen.



Innovationsbereiche

Die wesentlichen Innovationsbereiche sind bei innovativen Kraftstoffen und Antriebskonzepten verortet. Dies wird vor allem dann deutlich, wenn die international verfügbaren wissenschaftlichen Publikationen sowie die auf europäischer Ebene geförderten Forschungsprojekte analysiert werden. Maßgeblich für Innovationen für eine klimaverträglichere Luftfahrt sind elektrische Antriebe, nachhaltige Kraftstoffe aus Abfall bzw. Biomasse, grüner Wasserstoff (H_2), die Optimierung von Kraftstoffen, ein nachhaltiges Flugzeugdesign sowie die Emissionsreduktion durch Effizienzsteigerungen.

Die unterschiedlichen Innovationsbereiche sind durch verschiedene technologische Ansätze charakterisiert, wobei festzuhalten ist, dass keine einzelne Technologie allein ausschlaggebend für eine klimaneutrale Luftfahrt sein kann. Daher spielen auch über Antriebskonzepte und Kraftstoffe hinausgehende Innovationsbereiche eine wichtige Rolle.

Nachhaltige Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels – SAF) sind nicht auf Erdöl basierende Kraftstoffe, die als Kerosinalternativen entwickelt werden, um die CO_2 -Emissionen aus dem Flugverkehr zu reduzieren und die wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit zu stärken. SAF können aus vielen Ressourcen gewonnen werden, deren chemische Bestandteile in die reinen Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden können. Als Drop-in-Kraftstoffe können SAF mit bestehenden Kraftstoffen gemischt werden oder diese ersetzen, wobei keine oder nur kleine Änderungen an den Flugzeug- oder Motorkraftstoffsystemen, der Verteilungsinfrastruktur oder den Lagereinrichtungen erforderlich werden. Sie können in Biokraftstoffe und Elektrotreibstoffe (E-Fuels) unterschieden werden.

Ein Vorteil von Biokraftstoffen besteht darin, dass sich bei ihrer Verwendung keine Einschränkung der möglichen Reichweite ergibt, was sie insbesondere für Langstreckenflüge interessant macht, und dass sie der Luftfahrtindustrie die Möglichkeit bieten, ihre Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. Allerdings ist der Anteil an Biokraftstoffen bislang sehr gering, sodass geeignete Anreize und langfristige politische Maßnahmen notwendig sind, um eine Verwendung von SAF zu fördern.

E-Fuels ähneln in ihrer chemischen Zusammensetzung fossilen Kraftstoffen wie Kerosin. Sie werden durch Elektrolyse von Wasser (H_2O) in Wasserstoff und die anschließende Umwandlung von Wasserstoff mit CO_2 in synthetische Kraftstoffe hergestellt (Power-to-Liquid-Verfahren – PtL). Im Gegensatz zum auch dauerhaft nur als begrenzt verfügbar angesehenen Mengenpotenzial nachhaltiger Biokraftstoffe für den Luftverkehr wird das Mengenpotenzial von PtL-Kraftstoffen langfristig als ausreichend beurteilt. Sowohl für die Deckung des Strombedarfs von E-Fuels als auch von Elektroflugzeugen wäre ein massiver, zusätzlicher Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig, um diesen nachhaltig decken zu können.



Darüber hinaus wird derzeit Wasserstoff sowohl in gasförmiger als auch in kryogener Form als alternative Option für den Einsatz in kommerziellen Flügen erforscht. Da dieser Wasserstoff durch Wasserspaltung erzeugt wird, hängen die meisten der damit verbundenen Umweltauswirkungen mit der Art der verwendeten Elektrizität zusammen.

Neben den Bestrebungen, klimafreundlichere Kraftstoffe zu entwickeln, gewinnen auch die Anstrengungen zur Entwicklung innovativer Antriebskonzepte weiter an Dynamik. Immer mehr Prototypen und Demonstrationsprojekte werden entwickelt und erprobt, um die Praktikabilität, Effizienz und Sicherheit dieser Technologien zu demonstrieren. Bei elektrischen (Propeller-)Triebwerken werden Elektromotoren verwendet, die von Batterien angetrieben werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Düsenantrieben erzeugen sie keine direkten Emissionen. Bisher wurden nur wenige Konzepte für die kommerzielle Luftfahrt vorgestellt, die meisten davon mit geringer Nutzlast und sehr begrenzter Reichweite.

Wasserstoffbrennstoffzellen wandeln H_2 und Sauerstoff (O_2) in H_2O um, wobei gleichzeitig elektrische Energie erzeugt wird. Die Wasserstoffbrennstoffzelle kann entweder als alleiniger Antrieb oder in Kombination mit anderen Antriebsquellen wie Elektromotoren eingesetzt werden. Bei Hybridsystemen werden herkömmliche Düsentrriebwerke mit Elektromotoren kombiniert.

Hybride Antriebskonzepte gelten als Kompromisslösung, um einige der offenen Probleme von vollelektrischen Systemen zu überwinden. Sie könnten gewissermaßen eine Brücke zwischen herkömmlichen, fossilen Kraftstoffen und vollständig elektrisch oder mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen darstellen.

Da Turbofan-Triebwerke die am weitesten verbreitete Antriebstechnologie in Verkehrsflugzeugen sind, haben Effizienzsteigerungen in diesem Bereich ein sehr großes Potenzial, die Luftfahrt klimafreundlicher zu machen. Zu den Vorteilen der zuvor erläuterten Antriebstechnologien gehören die potenzielle Reduzierung von THG-Emissionen, die Diversifizierung der Energiequellen sowie die Lärminderung. Daneben gibt es eine ganze Reihe von technologischen Herausforderungen und Barrieren bei der Implementierung. Die beschriebenen Antriebskonzepte, wie Elektroantriebe, Wasserstoffbrennstoffzellen und Hybridantriebe, befinden sich aktuell noch in der Entwicklungsphase.

Darüber hinaus spielt die Optimierung des Flugbetriebs eine wesentliche Rolle. So könnten beispielsweise nicht nur die hohen Kraftstoffkosten von E-Fuels abgedeckt und die spezifischen CO_2 -Emissionen pro Fluggast reduziert, sondern auch die Reichweite von Flugzeugen mit alternativen Antriebskonzepten erhöht werden. Durch die aerodynamische Verbesserung, wie beispielsweise durch besonders glatte Oberflächenbeschaffenheit oder die Verwendung gebogener Flügelspitzen (Winglets), lässt sich ebenfalls der Kraftstoffverbrauch senken und die Reichweite erhöhen.



Eine weitere, derzeit untersuchte Option zur Verringerung des Gesamtkraftstoffverbrauchs auf Langstreckenflügen ist die Luftbetankung. Eine Alternative wären zusätzliche Zwischenstopps zur Betankung.

Eine optimierte Flugplanung auf der Ebene der Fluggesellschaften und des Flugverkehrsmanagements (Air Traffic Management – ATM) hat das Potenzial, die Emissionen bei der Durchführung von Flügen zu senken. Auch betriebliche Maßnahmen können erheblich dazu beitragen, die Effizienz zu erhöhen. Dazu gehören insbesondere ein verbessertes Luftraummanagement zur Vermeidung von Umwegen, effiziente Flugverfahren wie ein langsamerer Sinkflug, klimaorientierte Optimierung von Geschwindigkeit und Flugprofilen sowie eine erhöhte Flugzeugauslastung. Mithilfe fortgeschrittener Software und Algorithmen werden die effizientesten Flugrouten ermittelt, wobei Faktoren wie Wetterbedingungen, Luftverkehr und Treibstoffverbrauch berücksichtigt werden.

Um einen reibungslosen Betrieb an Flughäfen zu gewährleisten, ist eine Vielzahl an Bodenequipment notwendig. Der elektrische Betrieb von z.B. Flugzeugschleppern, Förderbändern, Gepäckwagen, Toilettenwagen, Trinkwasserwagen und Zubringertaxis könnte den ökologischen Fußabdruck der Luftfahrt reduzieren. Die Verbesserungen der Flughafeninfrastruktur, wie Rollwege, Start- und Landebahnen und Terminals, spielen eine entscheidende Rolle, um die Leerlaufzeiten von Flugzeugen zu minimieren und den Verkehrsfluss zu verbessern. Dadurch können der Treibstoffverbrauch am Boden reduziert, Emissionen verringert und Flughafenkapazitäten optimiert werden.

Digitale Simulationen von Flugzeugsystemen (digitale Zwillinge) helfen dabei, die Leistungen von Anlagen in Echtzeit digital zu simulieren, vorherzusagen und zu optimieren sowie neue Designs und Technologien virtuell zu testen, bevor physische Prototypen gebaut werden. Dies kann den Entwicklungsprozess beschleunigen, den Ressourcenverbrauch reduzieren und umweltfreundlichere Innovationen ermöglichen.

Klimaneutrale Luftfahrt in Deutschland

Angesichts des aktuellen Stands der Technik kann Folgendes konstatiert werden: Keine der betrachteten Strategien ist für sich genommen ausreichend, um die Emissionsziele zu erreichen, sondern es braucht eine Kombination unterschiedlicher Maßnahmen, die die jeweiligen Stärken und Schwächen der Innovationen sowie unterschiedliche Anwendungsbereiche berücksichtigt. SAF stellen dabei den wichtigsten Innovationsbereich mit kurzfristigem Zeithorizont dar, da sie bereits heute in der Bestandsflotte einsetzbar sind und Emissionen senken können. Hybride Antriebskonzepte haben das Potenzial, ab 2030 auf Regionalstreckenflügen, ab etwa 2040 auf Kurzstreckenflügen und ab etwa 2050 auf Mittelstreckenflügen zum Einsatz zu kommen. Es ist davon auszugehen, dass es vermutlich noch mindestens 20



bis 30 Jahre dauern wird, bis die vorgestellten Innovationen in relevanter Größe zur Anwendung kommen, da die Technologien entweder noch nicht ausgereift oder die verfügbaren Mengenpotenziale der Kraftstoffe kurzfristig nicht ausreichend sind.

Treiber und Barrieren für eine klimaneutrale Luftfahrt

Gesellschaftliche Treiber und Barrieren sind durch einen regen gesellschaftlichen Diskurs zu den ökologischen Folgen gekennzeichnet, der bislang aber noch nicht in einen deutlich erkennbaren Wertewandel mündet und zu einer Nachfrageveränderung nach Flugreisen führt. Getrieben wird vielmehr eine steigende Nachfrage nach Flugreisen durch das weltweite Bevölkerungswachstum sowie ein steigendes Mobilitätsbedürfnis und positive Wohlstandsentwicklungen. Unklar ist allerdings gegenwärtig, inwiefern die steigende Nachfrage zukünftig durch das aktuell eher knappe Angebot bedient werden kann. Auf jeden Fall dürften die Ticketpreise für Flüge steigen, sodass die künftige Entwicklung der Luftfahrt von der Zahlungsbereitschaft der Kund/innen abhängig ist. Hinzu kommt, dass mit der Entwicklung und Einführung neuer Technologien Sicherheitsbedenken und Akzeptanzfragen verbunden sein können. Hier sind allerdings belastbare Erkenntnisse zu den unterschiedlichen Innovationsbereichen bislang nur eingeschränkt verfügbar.

Wirtschaftliche Treiber und Barrieren sind vor allem durch das Investitionsumfeld zur Realisierung von Marktpotenzialen, die Fachkräfteverfügbarkeit sowie den Fachkräftebedarf und die Infrastrukturentwicklung charakterisiert. Zwar können die unternehmerischen und institutionellen Strukturen in Deutschland als leistungsfähig angesehen werden, jedoch ist insbesondere die Konkurrenzsituation zu anderen Branchen und Sektoren bei den benötigten Energieträgern eine zu lösende Herausforderung. Ähnliches gilt für den Bedarf und die Verfügbarkeit von Fachkräften. Zwar besteht hier eine grundsätzliche sehr gute Basis im Hinblick auf Ausbildungsmöglichkeiten und Qualifizierungsniveaus, jedoch zeichnet sich bereits jetzt ein Fachkräftemangel ab, der sich künftig in Konkurrenz zu anderen Sektoren und Branchen noch verschärfen dürfte. Letztlich ist es eine wirtschaftliche Herausforderung, die Infrastrukturen für die Produktion, den Transport und die Betankung sowohl für Wasserstoff als auch für SAF aufzubauen und zu skalieren und sich bei der Beschaffung gegenüber anderen Sektoren und Branchen zu behaupten.

Im Bereich Umwelt ist vor allem die Forschung zu den Effekten der Luftfahrt auf Atmosphäre und Klima von Bedeutung. Insbesondere zur Wirkung von Nicht-CO₂-Effekten bestehen gegenwärtig noch Wissenslücken, die es erschweren, effiziente Maßnahmen zur Mitigation der klimaschädlichen Effekte zu entwickeln. Bei der Betrachtung von Kompensationsmaßnahmen ist zu beachten, dass diese sich voneinander unterscheiden und unterschiedliche Wirkungen entfalten, bis hin zu Reboundeffekten, bei denen die Möglichkeit zur Kompensation einen Anstieg der Flugreisen bewirken kann.



Die Politik kann eine wichtige Rolle bei der Gestaltung eines möglichst klimaneutralen Luftverkehrs spielen. Insbesondere die Unterstützung beim Aufbau der erforderlichen Infrastrukturen sowie die Anpassung von Regularien, wie etwa eine Ausweitung des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-EHS), sollten zum einen dazu dienen, ein verlässliches Markt- und Investitionsumfeld zu schaffen, und zum anderen die Interessen der unterschiedlichen Stakeholder ausgleichen. Der Luftfahrtsektor ist geprägt von vergleichsweise langen Entwicklungs- und Zulassungszeiträumen für neue Technologien. Die Entwicklung und Zulassung neuer Flugzeugdesigns oder Triebwerke dauert schätzungsweise bis zu 15 Jahre, die Marktdurchdringung dann noch einmal bis zu 30 Jahre. Daher bedarf es einer erheblichen Steigerung öffentlicher und privatwirtschaftlicher Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie einer Beschleunigung von Entwicklungszyklen und Zulassungsverfahren. Auch die Anpassung von Zulassungs- und Zertifizierungsverfahren sowie die Weiterentwicklung von Standards spielen eine wichtige Rolle bei der Gestaltung der Innovationsbereiche und der Schaffung von Investitionssicherheit.

Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems

Das deutsche Luftfahrtinnovationssystem weist deutliche Stärken wie auch einige Schwächen auf. Die langjährigen Innovationsaktivitäten haben zur Herausbildung eines international bedeutsamen Innovationsökosystems geführt, innerhalb dessen ein Großteil der Wertschöpfungsstufen der Luftfahrt abgedeckt wird.

Handlungsfelder

Für die Gestaltung einer klimaverträglicheren Luftfahrt bestehen verschiedene Handlungsoptionen: zum einen solche, die sehr kurzfristig umgesetzt werden können und wirksam sind, und zum anderen diejenigen, deren Wirkungen erst mittel- bis langfristig einen Beitrag zur klimaneutralen Luftfahrt liefern können.

Kurzfristige Maßnahmen: Um die stärkere Nutzung von SAF zu unterstützen, bieten sich als Optionen die Reduktion des Aromatenanteils im Kerosin sowie eine Anpassung der Besteuerung an.

Die Nutzung von SAF könnte durch Book-und-Claim-Konzepte, also Zertifikate für die Nutzung von SAF, die Fluggesellschaften erwerben können, unterstützt und die Wertschöpfungs- bzw. Lieferkette von SAF auf diese Weise nachhaltig gestaltet werden.

Ein weiterer Hebel ist die Anpassung der Besteuerung der Luftfahrt durch Erhebung einer Kerosinsteuer. Auch die Optimierung von Flugrouten kann durch zeitnahe Zulassung dabei helfen, Emissionen zu reduzieren.



Abb. 1 Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • hohes Maß an Qualifizierungsmöglichkeiten für Fachkräfte • geeignete Transfermechanismen zur Unterstützung von Unternehmen bei der Durchführung ihrer Innovationsaktivitäten • Förderung des Bundes im Rahmen des LuFo Klima unterstützt die Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben • Digitalisierung bietet Potenziale für die Optimierung der Wertschöpfungskette und die Simulation des Gesamtsystems Luftfahrt • Effizienzsteigerungen durch Verbesserungen bestehender Technologien 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulierung etwa im Bereich Zertifizierung/ Zulassung, aber auch bei der Verpflichtung zur Kompensation • Mangel an geeigneten Fachkräften • hohe Kosten für Pfadwechsel bei langfristiger Technologieentwicklung • keine ausreichende Förderung von Demonstratorprogrammen • Unklarheiten bei Zuständigkeiten für Zertifizierung neuer Kraftstoffe • gegenwärtige Kompensationsmechanismen tragen zur Verlagerung klimaschädlicher Effekte bei • Fehlanreize durch etablierte Zertifikatshandelsysteme • geringe Relevanz deutscher und europäischer Anstrengungen angesichts des weltweit unterschiedlich starken Wachstums der Luftfahrt und des damit verbundenen Emissionsanstiegs

Quelle: Blumberg/Isenstadt 2019; Gloël et al. 2015; IEA 2018

Kurzfristig könnten die bestehenden Netzwerke von Innovationstreibern durch die Technologieförderung, insbesondere im Rahmen des LuFo Klima, gepflegt und ausgebaut werden.

Ein spezielles Augenmerk könnte auf das Segment der Privatflugzeuge gelegt werden, die insbesondere für Kurzstrecken genutzt werden. Hier zeigt sich in Deutschland eine erhebliche Zunahme der durchgeführten Flüge, verbunden mit einem unverhältnismäßigen Anteil an klimaschädlichen Emissionen. Da es sich in der Regel um Kleinflugzeuge handelt und überwiegend Kurzstrecken bedient werden, bietet sich dieses Segment an, um über eine Besteuerung bzw. den Emissionshandel und über die Einführung neuer Antriebskonzepte, wie etwa den batterieelektrischen Flugantrieb, die klimaschädliche Wirkung zu reduzieren.

Mittel- und langfristige Maßnahmen: Gestaltungsoptionen, die voraussichtlich erst mittel- bis langfristig Wirkung erzielen werden, müssen dennoch kurzfristig auf den Weg gebracht werden. Gerade angesichts der langfristigen Innovationszyklen sowie des Zeitbedarfs bei der Zertifizierung von Kraftstoffen und technischen Komponenten erscheint es notwendig, umgehend die Weichen für eine klimaneutrale Luftfahrt zu stellen. In diese Kategorie kann die Anpassung von Standards und Normen sowie der Sicherheitszertifizierungen, insbesondere mit Fokus auf (bislang nicht zugelassene) aromatenfreie SAF, gefasst werden. Angesichts der Interdependenzen zwischen Produktionsprozessen für unterschiedliche Varianten von SAF, möglicher Sektorkonkurrenzen bei der Produktion und Nutzung von Wasserstoff sowie der Herausforderung, Produktionskapazitäten von grünem Wasserstoff zu skalieren, erscheint eine



Sektorkopplung sinnvoll zu sein. Dadurch ließen sich Investitionslasten zum Aufbau ausreichender Infrastrukturen gerechter verteilen.

Mittelfristig bietet die Digitalisierung Potenziale, um die Luftfahrt sowie den Flugzeugentwurf und -betrieb effizienter zu gestalten. Eine entsprechende Förderung beim Ausbau digitaler Infrastrukturen in der Luftfahrt kann die betroffenen Produzenten und ihre Zulieferer dabei unterstützen, die Potenziale zu erschließen.

Um Konsument/innen bei der Verkehrsmittelwahl klimafreundlicherer Alternativen besser zu unterstützen, könnten „Klimafreundlich-Labels“ zu mehr Transparenz beitragen, wenn sich Flugreisen bzw. -routen im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln oder beim Vergleich unterschiedlicher Flugroutenoptionen als klimafreundlicher herausstellen sollten.

Die parallele Entwicklung verschiedener Technologien mit unklarem Durchsetzungspotenzial erfordert erhebliche finanzielle Anstrengungen. Insofern ist zur Schaffung eines verlässlichen Investitions- und Innovationsumfeldes eine sorgfältige Abwägung der unterschiedlichen Alternativen durch die Politik notwendig.



1 Einleitung

Im Horizon-Scanning des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag wurde 2021 das Thema „Technologien für einen nachhaltigen Flugverkehr“ als ein relevantes Zukunftsthema identifiziert, im Rahmen eines Themenkurzprofils aufbereitet und dieses der Berichterstattergruppe TA präsentiert (TAB 2022). 2022 beschloss der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung auf Vorschlag der Berichterstattergruppe TA zur vertiefenden Bearbeitung des Themas die Durchführung einer gleichnamigen TA-Kurzstudie durch die VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

In dieser Kurzstudie wird ein Überblick über die beiden Innovationsbereiche Kraftstoffe und Antriebskonzepte gegeben, die dazu beitragen können, die Luftfahrt klimaverträglicher zu gestalten. Weiterhin werden darüber hinausgehende Innovationen skizziert, die ebenfalls eine Rolle bei der Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt spielen. Die Analyse dieser Ansätze erfolgt vor dem Hintergrund der aktuellen und künftig erwarteten Entwicklung der weltweiten Luftfahrt und der damit zusammenhängenden Auswirkung auf den anthropogenen Klimawandel.

Vorgehen

Im Rahmen der Untersuchung wurde eine iterative Vorgehensweise gewählt. Ausgehend von einer Literaturrecherche und -analyse sowie Experteninterviews wurde ein Mapping aktueller technologischer und politischer Entwicklungen durchgeführt. Ein Fokus bei der Quellenauswahl lag u.a. auf der Berücksichtigung aktueller Strategie- und Positionspapiere, Weißbücher und Technologieroadmaps zu klimafreundlichem Luftverkehr. Die Interviews dienten dem Schließen von Wissenslücken sowie der Validierung der bislang gewonnenen Erkenntnisse. Zudem wurden auf Grundlage der Zwischenergebnisse Suchstrategien für eine Publikations- und Förderdatenanalyse entwickelt. Das Ergebnis dieses ersten Schrittes war ein Überblick über die wesentlichen Innovationsfelder, die zu einer Dekarbonisierung des Luftverkehrs beitragen können.

In einem zweiten Schritt wurden die wesentlichen Einflussfaktoren (Trends, Treiber und Barrieren) identifiziert, die bei der Implementierung innovativer und klimafreundlicher Lösungen eine Rolle spielen.

Anschließend wurde auf Grundlage der verfügbaren Informationen eine Bewertung der beiden zentralen Innovationsfelder vorgenommen. In diesem dritten Schritt wurden die jeweiligen Chancen und Risiken sowie Stärken und Schwächen im Rahmen einer SWOT-Analyse herausgearbeitet. Die Ergebnisse dieser Bewertung wurden in einem Expertenworkshop diskutiert, validiert und ergänzt. Danach konnte der Zugschnitt der zentralen politischen Handlungsfelder ermittelt werden. Ergänzt um Er-



gebnisse der Literaturrecherche, bilden die gewonnenen Erkenntnisse aus Interviews und Workshop die inhaltliche Basis für die Kurzstudie.

Aufbau der Kurzstudie

Zunächst werden Begriffsverständnis und Analyserahmen festgelegt, um die definitorischen Unterschiede zwischen klimafreundlicher, -neutraler und -verträglicher Luftfahrt herauszuarbeiten. Zudem wird der Fokus der Technikfolgenabschätzung festgelegt (Kap. 2.1). Weiterhin umfassen die folgenden Kapitel eine Darstellung der Klimawirkung der weltweiten Luftfahrt (Kap. 2.2) sowie einen Ausblick auf die möglichen künftigen Entwicklungen der Luftfahrt (Kap. 2.3).

Kapitel 3 spannt den politischen Rahmen auf, innerhalb dessen Zielsetzungen, Strategien, Maßnahmen sowie Regularien festgelegt werden. Aufgrund der hohen internationalen Verflechtung erfolgt eine Darstellung der wichtigsten Rahmenbedingungen auf nationaler (Kap. 3.2.1), europäischer (Kap. 3.2.2) sowie internationaler Ebene (Kap. 3.2.3).

In Kapitel 4 wird das Innovationssystem der deutschen Luftfahrtindustrie charakterisiert. Maßgeblich für die Innovationsfähigkeit von Unternehmen, Forschungsinstituten und Hochschulen ist die Technologieförderung der Bundesregierung (Kap. 4.1). Ausgehend von den über Jahrzehnte gewachsenen Strukturen haben sich regionale Schwerpunkte gebildet, die heute erheblich zur Wirtschaftsleistung beitragen (Kap. 4.2). Einen wesentlichen Anteil an der Innovationstätigkeit haben Cluster, in denen Akteure aus Theorie und Praxis eng miteinander zusammenarbeiten (Kap. 4.3).

In Kapitel 5 werden die beiden zentralen Innovationsbereiche Kraftstoffe (Kap. 5.2) und Antriebskonzepte (Kap. 5.3) erläutert. Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit neuen Entwicklungen ist ein Technologiemapping, das auf Grundlage einer Publikations- und Förderdatenanalyse die Schwerpunkte in den FuE-Aktivitäten in Deutschland und Europa ermittelt und deren wesentliche Merkmale skizziert (Kap. 5.1). Da Kraftstoffe und Antriebskonzepte nicht allein zum Erreichen von Klimaneutralität in der Luftfahrt führen werden, werden weitere Innovationsbereiche der Luftfahrt skizziert (Kap. 5.4).

In Kapitel 6 werden die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst. Dabei steht zunächst der Technologiemitmix im Fokus, der notwendig ist, um die unterschiedlichen Potenziale der Innovationsbereiche heben zu können (Kap. 6.1). In Kapitel 6.2 werden gesellschaftliche, wirtschaftliche, ökologische und politische Treiber und Barrieren im Umfeld der Luftfahrt erläutert, die den Gestaltungsraum für eine klimaneutrale Luftfahrt beeinflussen. Anschließend erfolgt eine Analyse der Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems (Kap. 6.3).



Abschließend werden die wesentlichen Handlungsfelder und -optionen aufgeführt, die sich politischen Entscheider/innen bieten, um durch Förderung der Treiber, Unterstützung der Stärken sowie Abbau von Barrieren und Ausgleich der Schwächen zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt beizutragen (Kap. 7).

Danksagung

Wir bedanken uns sehr herzlich bei den Expert/innen, die mit ihrer Expertise für Interviews und Diskussionen zur Verfügung standen.

Ein ebenso herzlicher Dank geht an Dr. Christoph Revermann und Dr. Arnold Sauter für die Durchsicht der Berichtsentwürfe und hilfreiche Verbesserungsvorschläge. Ebenso an Jost Lüddecke für das abschließende Lektorat. Zudem ist Anne-Sophie Piehl für die Aufbereitung von Grafiken und die Erstellung des Layouts zu danken.





2 Aktuelle und künftige Entwicklungen des Luftverkehrs

Weltweit steigt die Zahl der Flugreisen an. Um die aktuellen und künftigen Entwicklungen des Luftverkehrs hinsichtlich ihrer Klimawirkung einordnen sowie die Bedeutung einer klimaneutralen Luftfahrt ableiten zu können, wird zunächst zwischen den verschiedenen Begriffen Klimaneutralität, Klimafreundlichkeit und Klimaverträglichkeit unterschieden. Angesichts des weltweit wachsenden Flugverkehrs im Passagier- und Frachtbereich stellt das Erreichen von Klimaneutralität eine große Herausforderung dar. Hinzu kommen regional unterschiedliche Entwicklungen, so dass die größte Zunahme an Flügen in Weltregionen verortet ist, die weniger strenge Klimaziele verfolgen.

2.1 Begriffsverständnis und Fokus der Folgenabschätzung

Die Klimawirkung der Luftfahrt (Kap. 2.2) ist ebenso unbestritten wie der Umstand, dass eine klimaneutrale Luftfahrt zum Erreichen der Klimaziele notwendig ist (Kap. 3.1).

Von einer klimaneutralen Luftfahrt kann in dem Fall gesprochen werden, wenn Luftfahrt keinen Nettobeitrag zur globalen Erderwärmung mehr leistet (Scholz 2021, S.31). Von Net Zero (Nettonull) kann gesprochen werden, wenn die Klimawirkungen der CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte nicht nur reduziert, sondern auch kompensiert und aktiv entfernt werden (ClimatePartner 2024). Bei dem Fokus auf die Klimaneutralität der Luftfahrt und nicht etwa auf den Oberbegriff Nachhaltigkeit bleiben weitere Effekte der Luftfahrt auf die Umwelt und die Gesellschaft, wie z.B. Lärm oder soziale Aspekte, außen vor (DLR 2021, S.10).

Eine klimaneutrale Luftfahrt leistet keinen Nettobeitrag zur globalen Erderwärmung.

Ähnlich verhält es sich mit dem Begriff der umweltverträglichen Luftfahrt, die nicht nur CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Effekte umfasst, sondern auch weitere, die Umwelt schädigende Faktoren, wie etwa Lärm, Flächenverbrauch, Wasserbedarf etc. (Scholz 2021, S.31). Der Begriff klimaverträgliche bzw. klimafreundliche Luftfahrt wiederum umfasst daher nur diejenigen Faktoren, die auf das Klima wirken, also die CO₂- und Nicht-CO₂-Emissionen. Eine klimaverträgliche Luftfahrt ist nicht auf einen absoluten Nullwert der Emissionen ausgerichtet (DLR 2021, S.10).

Bei der Betrachtung der beiden Innovationsbereiche Kraftstoffe (Kap. 5.2) und Antriebskonzepte (Kap. 5.3) liegt zunächst der Fokus darauf, den Beitrag zu analysieren, den Innovationen in diesen beiden Bereichen zum Erreichen der Klimaneutralität in der Luftfahrt beitragen können. Weitere Aspekte, wie etwa die klimaneutrale Gestaltung von Flughäfen und sonstiger, für die Luftfahrt relevanter Infrastruktur, werden an geeigneten Stellen aufgeführt. Eine vertiefte Analyse des Gesamtsystems Luftfahrt ist jedoch im Rahmen der Kurzstudie nicht möglich.



Aus Gründen der eingeschränkten Informations- und Datenverfügbarkeit¹ sowie aufgrund der überwiegenden Betrachtung der Entwicklungen der zivilen Luftfahrt wird im Rahmen dieser Kurzstudie die Betrachtung der militärischen Luftfahrt ausgeklammert. Alle folgenden Ausführungen sind daher auf die zivile Luftfahrt bezogen.

Neben technischen Innovationen gibt es weitere Ansätze, die dazu beitragen können, Klimaneutralität in der Luftfahrt zu erreichen. Dazu zählen die Kompensation von Emissionen, die Steigerung der Effizienz sowie die Vermeidung von Flügen (Öko-Institut 2020b). Diese Ansätze werden an geeigneten Stellen im Rahmen der Analyse aufgegriffen.

2.2 Die Klimawirkung der Luftfahrt

Die Verbrennung von Flugzeugtreibstoff, überwiegend Kerosin, erzeugt CO₂ (Bopst et al. 2019b, S.16). In der Atmosphäre sorgt CO₂ dafür, dass ein Teil der von der Erde in den Weltraum abgegebenen Wärme absorbiert und reflektiert wird (Wagener 2019). CO₂ hat somit einen direkten Effekt auf das Klima, der zudem noch weltweit wirkt und sehr lange andauern kann, da CO₂ über Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben kann (Öko-Institut o.J.e). Eine Betrachtung der historischen Entwicklung zeigt zudem, dass zwischen 1940 und 2018 ca. 1,5 % der gesamten durch Menschen verursachten CO₂-Emissionen auf die Luftfahrt zurückzuführen sind (32,6 Mrd. t) und dass rund die Hälfte dieser Emissionen in den vergangenen 20 Jahren entstanden ist (Lee et al. 2021).

Die internationale Luftfahrt hat einen Anteil von ca. 3,5 bis 5 % an der weltweiten, menschengemachten Erderwärmung.

Die weltweite Luftfahrt trägt zur anthropogenen Klimaerwärmung bei. Maßgeblich verantwortlich für die menschengemachte Klimaerwärmung ist laut dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2023, S.6) der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (IPCC 2023). Aktuell ist die durchschnittliche Temperatur um ca. 1,1 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter erhöht. Die internationale Luftfahrt hat Schätzungen zufolge einen Anteil von ca. 3,5 bis 5 % an der anthropogenen Erwärmung (Dahlmann et al. 2023, S.23; Klöwer et al. 2021, S.4; Lee et al. 2021), d.h., in ihrer gegenwärtigen Form ist sie für einen Temperaturanstieg von 0,044 °C verantwortlich.

Bisheriger Höhepunkt der jährlichen Emissionen der globalen Luftfahrt war ein Ausstoß von ca. 1.035 Mio. t CO₂ im Jahr 2019. Im Zuge der COVID-19-Pandemie kam es insbesondere 2020 zu einem drastischen Rückgang der Emissionen aufgrund der

¹ Das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg 2022) gibt beispielsweise an, dass 2021 der Anteil der im Verkehrssektor ermittelten Emissionen i.H. v. 148 Mio. t CO₂-Äquivalenten bei ca. 0,53 % lag. Das entspricht 0,78 Mio. t. Davon entfallen 0,47 Mio. t auf den Verbrauch von Flugkraftstoff. Zuletzt zeigte sich hier eine steigende Tendenz (ausgehend von 0,43 Mio. t für 2018), was in der wachsenden Aufgabenerfüllung der Luftwaffe begründet ist (BMVg 2022, S.22). Auch wird in der Verantwortung des BMVg (2022, S.23 f.) Forschung zur Nutzbarkeit synthetischer Kraftstoffe im militärischen Kontext vorangetrieben.



weltweiten Einstellung des Flugverkehrs. Jedoch wurden bereits 2021 wieder ca. 720 Mio. t CO₂ ausgestoßen (Kim/Teter o.J.). 2023 wurde zudem die bislang höchste Anzahl an Flügen² an einem einzigen Tag ermittelt (Pax Global Media 2023), ein Anzeichen für eine andauernd hohe Nachfrage nach Flügen.

In Europa und auch in Deutschland sind vergleichbare Entwicklungen feststellbar. In Europa verursacht die Luftfahrt ca. 4 % der gesamten jährlichen THG-Emissionen. Bis zum coronabedingten Einbruch 2020 sind diese Emissionen innerhalb von 30 Jahren um beinahe 150 % gestiegen (EP 2019). Der Blick auf Deutschland zeigt, dass 2018 3,4 % (29,4 Mio. t) der gesamtdeutschen CO₂-Emissionen durch den internationalen Luftverkehr von und nach Deutschland und 0,33 % durch den inländischen Luftverkehr (BDL 2022a; Öko-Institut 2020a, S.10) verursacht wurden.

Allerdings steht CO₂ nur für rund ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs (Lee et al. 2021). Die Nicht-CO₂-Effekte spielen sogar eine weitaus bedeutendere Rolle (Interviews Nagel u. Scholz; Bopst et al. 2019a; Bopst et al. 2019b). Bei der Verbrennung von Kerosin entstehen Rußpartikel, Wasserdampf, Schwefel- und Stickoxide, die zur Bildung von Kondensstreifen und Zirruswolken führen (Bopst et al. 2019b, S.16; Lee et al. 2021, S.2) sowie – in deutlich kleineren Mengen – Methan (28-fache Klimawirkung von CO₂) und Lachgas (256-fache Klimawirkung von CO₂) (Wagener 2019).

Die Klimawirkung der Luftfahrt lässt sich in direkte und indirekte Effekte unterteilen. Direkte Effekte werden durch Wasserdampf und Ruß verursacht, die das Sonnenlicht absorbieren, also erwärmend wirken. Indirekte Effekte werden durch Stickoxide, Schwefeloxide und Kondensstreifen sowie Zirruswolken verursacht. So führen beispielsweise Stickoxide in der Atmosphäre zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration und bewirken somit einem wärmenden Effekt. Stickoxide können auch dazu beitragen, dass der Methangehalt der Atmosphäre zurückgeht. Dadurch entsteht ein kühlender Effekt (Lee et al. 2021, S.2). Schwefeloxide können in der Atmosphäre zur Entstehung von saurem Regen führen sowie zur Bildung von Aerosolen beitragen, die ihrerseits zur Streuung des Sonnenlichts und damit zur Kühlung beitragen können (ADV o.J.; Öko-Institut o.J.e). Die Effekte von Kondensstreifen und Zirruswolken sind neben denen von CO₂ als am stärksten einzuschätzen, denn auch Wolkenbildung kann zur Erwärmung beitragen. Im Gegensatz zu den Effekten von CO₂ ist die Wirkung von Kondensstreifen und Zirruswolken zeitlich und örtlich stärker begrenzt (Öko-Institut o.J.e). Die Stärke dieser Klimawirkung lässt sich gegenwärtig noch nicht genau quantifizieren und dürfte unterschiedlich stark ausfallen, je nachdem, ob Inlandsflüge oder Langstreckenflüge betrachtet werden (Allekotte et al. 2020, S.62).

2 Die Zahlen bilden nur einen Teil der weltweiten Flüge ab, da beispielsweise militärische Flüge, Privatflugzeuge und Frachtflüge nicht mit erfasst werden. Angesichts der Dunkelziffer dürfte die tatsächliche Zahl noch höher liegen.



Nicht alle Effekte führen ausschließlich zu einer Erwärmung des Klimas. Vielmehr können einzelne Wirkungszusammenhänge auch in einer Abkühlung resultieren. Zudem entstehen die Effekte über unterschiedlich lange Zeiträume und können auf unterschiedlichen Ebenen – lokal bis global – wirken. Insgesamt betrachtet überwiegen allerdings Effekte, die zu einer Erwärmung des Klimas beitragen (Öko-Institut o.J.e). Tabelle 1 gibt einen Überblick über unterschiedliche Effekte, deren Dauer und geografische Verteilung.

Tab. 1 Klimawirkungen der Luftfahrt

Klimafaktoren	CO ₂	NO _x → Ozon (O ₃) Anstieg	NO _x → Methan (CH ₄) Senkung	NO _x → Ozon (O ₃) Senkung	Sulfat Aerosole	Ruß	Kondensstreifen und Zirruswolken
Klimawirkung	erwärmend	erwärmend	abkühlend	abkühlend	abkühlend	erwärmend	erwärmend
Dauer	Jahrhunderte	Wochen bis Monate	Dekaden	Dekaden	Tage bis Wochen	Tage bis Wochen	Kondensstreifen: Stunden Zirruswolken: Stunden bis Tage
räumliche Verbreitung	global	kontinental bis global	kontinental bis global	kontinental bis global	kontinental bis global	lokal bis global	lokal bis global
wissenschaftliche Erkenntnisse	gut	mittel	mittel	mittel	direkte Effekte: gut indirekte Effekte: schlecht	direkte Effekte: gut indirekte Effekte: schlecht	schlecht

Quelle: Öko-Institut o.J.e unter Verweis auf Offset-Guide o.J.

Während die Wirkung von CO₂ gegenwärtig wissenschaftlich fundiert nachvollzogen werden kann, sind die unterschiedlichen Wirkungen der Nicht-CO₂-Effekte noch nicht in Gänze verstanden (Interview Scholz; Bopst et al. 2019b; Gössling/Humpe 2020).

Die Klimawirkung der Luftfahrt lässt sich noch differenzierter darstellen, wenn man berücksichtigt, dass die zurückgelegten Strecken unterschiedlich lang sind und verschiedene Reiseflughöhen aufweisen. Zudem werden auch unterschiedliche Flugzeugarten eingesetzt. Eine Analyse von europäischen Flugdaten konnte beispielsweise zeigen, dass die Emissionen von Kleinflugzeugen auf innereuropäischen Flügen um das 10-Fache höher sind als auf vergleichbaren Linienflügen³ (Transport & Environment 2021, S.35 f.).

³ Vergleichsmaßstab ist g CO₂ pro PKM auf einer Strecke von 500 km.



Stellt man die zurückgelegten Strecken gegenüber, so lässt sich – wiederum aus europäischer Perspektive – feststellen, dass Kurzstrecken (< 500 km) ca. 4,3 % der CO₂-Emissionen der Luftfahrt ausmachen. Auf Langstrecken (> 4.000 km) entfallen beinahe 52 % der Emissionen, obwohl nur ca. 6 % der Flüge in Europa Langstreckenflüge sind (airliners.de 2021). Weltweit sieht es etwas anders aus: Ca. 42 % der CO₂-Emissionen wurden 2020 auf der Langstrecke verursacht, 51 % auf Kurz- und Mittelstrecken und 7 % von Regionalflügen⁴ (Kirchgeßner 2022).

Verglichen mit anderen Verkehrsträgern wie dem Pkw, der für ca. 18 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich ist (BDL 2022a), verursacht die Luftfahrt nur einen kleinen Teil der weltweiten Emissionen, etwa in einer ähnlichen Größenordnung wie der globale Schiffsverkehr. Einen deutlich geringeren Anteil der Emissionen verursacht beispielsweise in Europa der Schienenverkehr mit ca. 0,1 % der CO₂-Emissionen (EP 2019). Setzt man allerdings die Emissionen in Bezug zu der Verkehrsleistung, zeigt sich beispielsweise für Deutschland, dass ein Inlandsflug ca. 60 % mehr Emissionen verursacht als die Fahrt mit einem Pkw (Öko-Institut o.J.).

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die Klimawirkung der Luftfahrt besteht darin, dass der Ausstoß von CO₂ sowie weiteren Gasen und Partikeln, den Nicht-CO₂-Effekten, insgesamt zu einer Erwärmung der Atmosphäre beiträgt. Der Anteil liegt zwischen ca. 3 bis 5 %, wenn man die Nicht-CO₂-Effekte mitberücksichtigt. Die Wirkung variiert dabei u.a. in Abhängigkeit von Flugstrecken sowie Flugzeugtypen.

Der stärkste Emissionsanstieg ist durch die Luftfahrt entstanden.

4 Es gibt unterschiedliche Definitionen für Kurz-, Mittel- und Langstreckenflüge bzw. Regionalflüge, sodass eine Vergleichbarkeit nicht ohne Weiteres möglich ist. Bisweilen wird nicht nur die Strecke, sondern auch die Dauer zur Einteilung herangezogen. Einen Überblick über andere Klassifizierungen bietet Wikipedia o.J.



Wenngleich der Anteil der Emissionen verglichen mit anderen Verkehrsträgern gering erscheint, so ist der stärkste Anstieg der Emissionen in den vergangenen Jahrzehnten der Luftfahrt zuzuschreiben. Für die Zukunft kann erwartet werden, dass der Anteil der Emissionen künftig in Abhängigkeit von der weiteren Entwicklung der Luftfahrt (Kap. 2.3) weiter ansteigen wird.

2.3 Zukünftige Entwicklungen der Luftfahrt

Die zukünftigen Emissionen der weltweiten Luftfahrt hängen von der weiteren Entwicklung der Anzahl der Fracht- und Passagierflüge, der Passagierzahlen und Frachtmengen sowie der zurückgelegten Personenkilometer (PKM)⁵ ab, die in den vergangenen 50 Jahren kontinuierlich angestiegen sind.

Seit Ende der 1970er Jahre sind die Passagierzahlen um das knapp 15-Fache gestiegen, von ca. 310 Mio. auf 4,46 Mrd. Flugreisende im Jahr 2019 (Worldbank o.J.a). Nach dem COVID-19-bedingten Einbruch im Jahr 2020 (1,77 Mrd. Passagiere) ist die Zahl im Jahr 2021 bereits wieder bei ca. 50 % des vorpandemischen Niveaus angekommen (2,28 Mrd. Passagiere; Worldbank o.J.a).

Zwischen 2014 und 2019 stieg zudem die Anzahl der durchgeführten Flüge⁶ stetig an, von 33 Mio. Flügen auf 38,9 Mio. Flüge für 2019 (IATA 2023c). Nach dem COVID-19-bedingten Einbruch sind die Zahlen wieder kontinuierlich gestiegen und lagen 2022 wieder bei ca. 27,9 Mio. Flügen. Für 2023 wird geschätzt, dass in etwa das Niveau von 2014 erreicht wird (airliners.de 2021; IATA 2023c u. 2024).

Gemessen in PKM war zwischen 2014 und 2019 ein Anstieg um rund ein Drittel zu verzeichnen, von ca. 6,44 Billionen auf ca. 8,91 Billionen PKM (Boeing 2022a; Graver et al. 2019).

Entwicklungen im globalen Frachtverkehr

Die weltweit beförderte Menge an Luftfracht ist seit 2004 annähernd kontinuierlich gestiegen. Lag die Gesamtmenge 2004 noch bei ca. 41 Mio. t, waren es 2014 ca. ein Drittel mehr (54 Mio. t) und erreichte 2021 einen vorläufigen Höchststand mit 65,6 Mio. t (IATA 2023d). Gemessen in Frachttonnenkilometern (FTK)⁷ wurden 2014⁸ 209.877 Mio. FTK geleistet, 2021 ca. 285.434 Mio. FTK. Das bedeutet einen

5 Maßeinheit für die Beförderung eines Fluggastes über eine Strecke von 1 km.

6 Verschiedene Quellen zeigen hier unterschiedliche Aussagen: IATA 2023c geht für 2014 von 36,9 Mio. Flügen aus; Worldbank o.J.a und IATA 2024 gehen von ca. 33 Mio. Flügen aus; siehe außerdem Worldbank o.J.b.

7 FTK ist – analog zu PKM – eine Leistungseinheit, die angibt, wie viel Fracht (in t) über welche Strecke befördert wurde. Näher unterschieden werden kann noch zwischen angebotener und tatsächlich beförderter Leistung.

8 Frühere Zahlen liegen nicht vor.



Anstieg um ca. 36 % (Boeing 2022b, S.113; Friedmann/Belz 2022, S.16). Um die Luftfracht zu transportieren, wurden ca. 2.100 Frachtflugzeuge eingesetzt – eine Zahl, die in den nächsten rund 20 Jahren auf über 3.600 steigen könnte (Boeing 2022a).

Verglichen mit anderen Verkehrsträgern, insbesondere der internationalen Schifffahrt, macht der Luftfrachtverkehr allerdings nur einen kleinen Teil am weltweit beförderten Güter- und Warenverkehr aus, wobei die Emissionen in der Schifffahrt und der Luftfahrt ähnlich hoch sind (Möller 2023).

Entwicklung in Deutschland

Die Anzahl der beförderten Passagiere stieg in den letzten 20 Jahren kontinuierlich an, von ca. 136 Mio. im Jahr 2004 auf ca. 227 Mio. Passagiere im Jahr 2019. Nach dem pandemiebedingten Einbruch (2020: ca. 58 Mio. Passagiere) erhöhte sich die Anzahl im Jahr 2022 bereits wieder auf ca. 156 Mio. Menschen (Statista 2023a).

Dabei kann unterschieden werden zwischen innerdeutschen Flügen (18,8 Mio. Menschen), inhereuropäischen Flügen (116,6 Mio. Menschen) und interkontinentalen Flügen (29,3 Mio. Menschen; Statista 2023a).

Die innerdeutsche Luftfahrt in Deutschland hat einen Anteil zwischen 5 und 6 % an der im Personenverkehr erbrachten Verkehrsleistung⁹ (Statista 2023, S.16). Es wurden ca. 10 Mrd. PKM¹⁰ geleistet, beinahe eine Verdoppelung gegenüber 1991 (DLR 2022). Bis zur COVID-19-Pandemie gab es hier einen stetigen Anstieg, ehe der Anteil 2020 auf 2 % zurückging. Seitdem ist wieder ein Anstieg zu beobachten.

In Deutschland ist der Anteil der Luftfracht am innerdeutschen Güterverkehr sehr gering (2021: 0,3 %; UBA o.J.) verglichen mit ca. 72,1 %, die auf den Straßen transportiert werden, und 18,5 % auf dem Schienenweg. Allerdings stieg die beförderte Menge zwischen 2006 und 2021 stetig an und erreichte 2021 mit 5,3 Mio. t einen vorläufigen Höhepunkt, ehe es 2022 einen Rückgang auf 4,9 Mio. t gab (Statista 2022, S.25). Das beförderte Volumen könnte bis 2030 auf ca. 7,3 Mio. t steigen (Bopst et al. 2019b, S.11).

Erwartete Entwicklung bis 2050 – international und in Europa

Die Branche ist insgesamt von einem starken Wachstum gekennzeichnet. Sowohl vor als auch während der COVID-19-Pandemie wiesen unterschiedliche Prognosen so-

⁹ Verkehrsleistung wird in PKM ausgedrückt, das Verkehrsaufkommen anhand der Anzahl der Passagiere bemessen.

¹⁰ Start und Ziel in Deutschland



wie Szenarien¹¹ auf ein anhaltendes Wachstum der globalen Luftfahrt in den nächsten Jahrzehnten hin.

2018 schätzte die IATA (2018), dass sich die Anzahl der weltweiten Flugpassagiere innerhalb eines Zeitraums von 20 Jahren mehr als verdoppeln würde: von ca. 4 Mrd. im Jahr 2017 auf 8,2 Mrd. Passagiere im Jahr 2037. Nicht nur das Passagieraufkommen soll steigen, auch die Verkehrsleistung ist durch einen kontinuierlichen Anstieg gekennzeichnet. Ebenfalls 2018 rechneten Airbus und Boeing mit einer Gesamtleistung zwischen 17,5 Mrd. und ca. 19 Mrd. PKM im Jahr 2038 (Bopst et al. 2019a, S.22). Das bedeutet, dass mehr Menschen weitere Strecken zurücklegen. Trotz Effizienzsteigerungen geht damit auch ein steigender Kerosinbedarf einher (Bopst et al. 2019a, S.26).

Die Trendunterbrechung 2020 im Hinblick auf Passagierzahlen, Anzahl der Flüge sowie geleistete PKM scheint nur eine Momentaufnahme gewesen zu sein. Denn nicht nur stiegen die Zahlen in den darauffolgenden Jahren wieder an, sondern auch die unter dem Eindruck dieses Einbruchs entwickelten Prognosen sahen weiterhin einen stetigen Anstieg vor (Gelhausen et al. 2021, S.2). 2022 schätzte Boeing (2022a) in einer Marktanalyse, dass die Verkehrsleistung sich bis 2041 annähernd verdoppeln würde und auf ca. 20 Mrd. PKM steigen könnte. Damit bewegt sich diese Schätzung in einer vergleichbaren Größenordnung wie diejenigen, die vor Auftreten der COVID-19-Pandemie erstellt wurden.¹²

Weltweit steigt die Zahl der Flüge stark an.

Die Anzahl der Flüge könnte in den nächsten rund 15 Jahren weltweit um jährlich 1,1 bis 1,4 % auf 49,5 Mio. bis 52,7 Mio. Flüge steigen, die Verkehrsleistung auf 14,6 Mrd. (2,8 % jährlich) bis 16,9 Mrd. (3,5 % jährlich) PKM (Gelhausen et al. 2021, S.10 ff.). Weltweit würden dann 2050, der Zielmarke für eine klimaneutrale Luftfahrt, bereits 10 Mrd. Passagiere jährlich unterwegs sein (ATAG 2021, S.21 f.). Dabei soll das größte Wachstum¹³ in Asien sowie im mittleren Osten stattfinden, gefolgt von Afrika, Lateinamerika, Nordamerika und Europa (ATAG 2021, S.32). Ausgewählte Treiber und Barrieren für diese Entwicklungen werden in Kapitel 6.2 dargestellt.

11 Insbesondere Betrachtungen der Entwicklungen bis 2050 sind häufig als Szenarien formuliert, da eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf die jeweils betrachteten Größen wie beispielsweise Anzahl der Flugreisen, Passagierzahlen oder Größe der Flugzeugflotte wirkt. Bei den hier dargestellten Entwicklungen handelt es sich entweder um lineare Fortschreibungen (Prognosen) oder aber um ausgewählte Entwicklungspfade im Rahmen unterschiedlicher Szenarien. Aus Gründen der Komplexitätsreduktion muss dabei auf eine ausführliche Darstellung aller unterschiedlichen Szenarien sowie der jeweils zugrunde liegenden Parameter verzichtet werden. Beispiele für Szenarien finden sich u.a. in ATAG 2021; Eurocontrol 2022; Graver et al. 2022; Leopold et al. 2021 u. Michelmann et al. 2023. Eine Gegenüberstellung verschiedener Szenarien und Prognosen ist beispielsweise verfügbar bei Graver 2022.

12 Anmerkung: Ein Großteil der verwendeten Quellen basiert auf Daten und Annahmen, die vor dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine erhoben bzw. getroffen wurden. Dementsprechend sind die Effekte, die aus der andauernden (Stand 1.11.2023) kriegerischen Auseinandersetzung auf die weltweite Luftfahrt resultieren, nur schwer einschätzbar.

13 Die in der zitierten Quelle dargestellte Entwicklung basierte auf Daten von 2019, lässt also die Effekte der COVID-19-Pandemie außen vor.



In Europa könnten 2050 zwischen 13,2 Mio. und 19,6 Mio. Flüge jährlich stattfinden, was im Durchschnitt ein jährliches Wachstum von 1,2 %, ausgehend von 2019 (11,1 Mio. Flüge), bedeutet. Davon sollen ca. 88 % der Flüge Passagierflüge sein (1,1 % Wachstum jährlich), 5 % Frachtflüge (2,9 % Wachstum jährlich) und 7 % Geschäftsreisen (1,4 % Wachstum jährlich) (Eurocontrol 2022, S.10). Insbesondere zunehmen soll die Zahl der Langstreckenflüge, wodurch ca. 53 % der Emissionen verursacht werden würden (Eurocontrol 2022, S.14).

Mit der angenommenen wachsenden Nachfrage nach Flugreisen steigt der Bedarf einer Erweiterung der Flugzeugflotten. Auch hier lässt sich ein vorübergehender Rückgang von weltweit ca. 28.000 Flugzeugen im Jahr 2020 auf ca. 24.000 Flugzeuge im Jahr 2021 im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie beobachten. Allerdings wird eine Ausweitung der Flugzeugflotte bis 2032 um ca. 50 % auf etwa 38.000 Flugzeuge geschätzt (Oliver Wyman 2022). 2042 könnten bereits knapp 47.000 Flugzeuge, davon ca. 40.000 neue Flugzeuge, weltweit im Einsatz sein (Airbus 2023, S.14).

Wenn man anhand der Klimawirkungen sowie der aktuellen und sich zukünftig abzeichnenden Entwicklungen in der Luftfahrt nachvollziehen möchte, welchen Einfluss die Luftfahrt auf das Klima künftig ausüben könnte, lässt sich dies beispielsweise über den Kraftstoffverbrauch nachvollziehen. Dieser steigt angesichts der zuvor genannten Entwicklung schätzungsweise jährlich um ca. 3,5 % an, wobei pro kg verbranntem Treibstoff ca. 3,16 kg CO₂, 1,23 kg Wasserdampf, 15,14 g Stickoxide, 1,2 g Schwefeloxide und 0,03 g Ruß ausgestoßen werden (Scholz 2021, S.29; Klöwer et al. 2021, S.2). Dementsprechend steigen mit der Zunahme der weltweiten Luftfahrt auch die CO₂-Emissionen, ebenso die zuvor genannten Nicht-CO₂-Effekte.



2040 könnte die globale Flugzeugflotte 390 Mio. t Treibstoff verbrauchen verbunden mit einem entsprechenden Ausstoß von THG-Emissionen (Le Feuvre 2019).¹⁴ 2050 könnte der Verbrauch bei 500 Mio. t liegen (Fleming et al. 2022, S.26). Dabei soll der Kerosinverbrauch verglichen mit 2015 um das 2,4- bis 3,8-Fache steigen (Öko-Institut 2020b, S.3). Ohne entsprechende Maßnahmen würde die Luftfahrt also 2050 ca. 1.600 Mio. t CO₂-Emissionen ausstoßen (Fleming et al. 2022, S.28), ein Anstieg um ca. 60 % verglichen mit 2019. Hinzu kommen die bereits genannten Nicht-CO₂-Effekte in der entsprechenden Größenordnung.

¹⁴ In einem Szenario, in dem keine Reduktionen oder klimafreundliche Treibstoffe, Effizienzsteigerungen etc. umgesetzt werden.



3 Politischer Rahmen

Der politisch-regulatorische Rahmen für die Reduzierung der Klimawirkung des Flugverkehrs setzt sich zusammen aus verschiedenen nationalen und europäischen Regelungen und Strategien sowie aus internationalen Verpflichtungen im Kontext der ICAO und der UNFCCC. Insbesondere gegenwärtige Aktivitäten auf europäischer Ebene, etwa die Verschärfung des Emissionshandels oder neue Anreize zur Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe, sind wichtige Treiber zur Weiterentwicklung dieses Rahmens. Dabei herrscht eine hohe Dynamik in der Diskussion, welche Politikinstrumente und -ansätze am effektivsten zu einem möglichst klimaneutralen Flugverkehr führen können. Hierbei spielt eine wichtige Rolle, ob man primär den deutschen, den europäischen oder den internationalen Luftverkehr betrachtet. In diesem Zusammenhang wurde in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an forschungs- und wirtschaftspolitischen Strategie- und Positionspapieren, Weißbüchern sowie Technologieroadmaps zum Thema klimaneutrales Fliegen bzw. klimaneutraler Luftverkehr von politischer und wirtschaftlicher Seite sowie durch Thinktanks und Forschungseinrichtungen publiziert. Darin werden einerseits mögliche technologische Entwicklungspfade und andererseits verschiedene politische Strategien zur Erreichung eines möglichst klimaneutralen Luftverkehrs dargestellt.

3.1 Bestandteile politischer Rahmenbedingungen

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Notwendigkeit, den deutschen, europäischen und internationalen Luftfahrtsektor in möglichst naher Zukunft klimaneutral zu gestalten bzw. die Weichen für eine klimaneutrale Zukunft des Sektors zu stellen, bei sämtlichen (politischen) Akteuren bzw. in allen Strategien und Programmen anerkannt wird. Auch die Luftfahrtbranche im engeren Sinne – also Industrie, Flughäfen und Airlines – erkennt dieses Ziel an, wie etwa die strategische Zielsetzung eines CO₂-neutralen Flughafen- und Flugbetriebs des Bundesverbandes der Luftverkehrswirtschaft zeigt (BDL 2021). Über die Notwendigkeit und die „Potenziale für klimaneutrales Fliegen besteht weitgehend Konsens zwischen Luftverkehrswirtschaft und Luftfahrtindustrie, Wissenschaft und Politik. Die Diskussion dreht sich in diesem Sinne nicht um das ‚Ob‘, sondern um die konkreten Maßnahmen und Instrumente, die klimapolitische Ziele mit der Funktionsweise des internationalen Luftverkehrs in Einklang bringen sollen“ (Fücks et al. 2023). Zum „Wie“ gibt es dagegen eine recht große Bandbreite von Einschätzungen und Vorschlägen. Ein zentraler Diskussionspunkt ist etwa die notwendige Regulierungstiefe des Flugverkehrs und der Zusammenhang mit möglichen Wettbewerbsnachteilen deutscher und europäischer Unternehmen und einem etwaigen Carbon-Leakage-Effekt.¹⁵ Dabei stimmt der Großteil der Akteure grundsätzlich überein, dass ohne

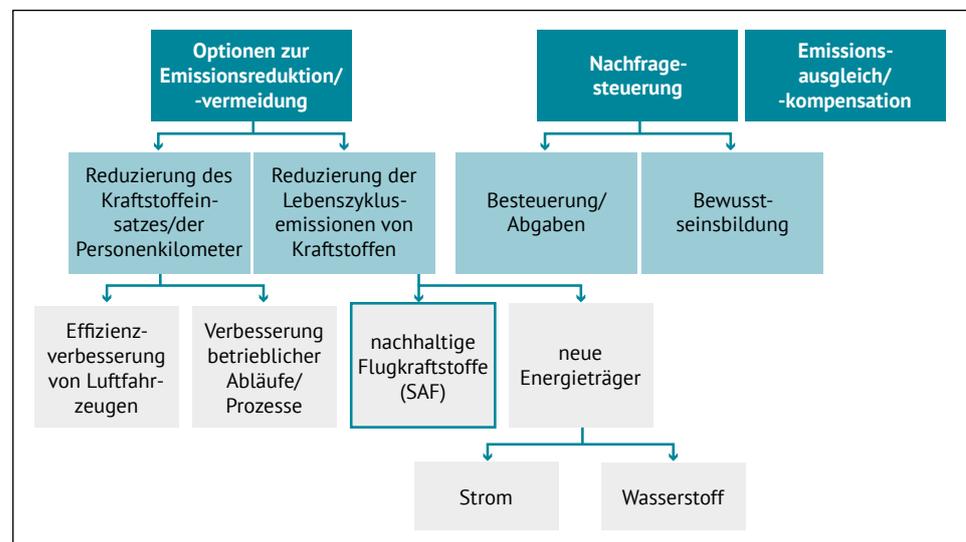
¹⁵ Als Carbon Leakage wird die Verlagerung von CO₂-Emissionen – etwa durch die Verlagerung treibhausgasemittierender Industrien – in Länder außerhalb der Europäischen Union bezeichnet, um die strengeren europäischen Auflagen für Treibhausgasemissionen zu umgehen (EP 2021)



nachhaltige Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte – als zentrale Stellschrauben in einem umfangreichen Maßnahmenbündel (ICAO 2022) – die Gestaltung eines klimaneutralen Luftverkehrs nicht möglich sein wird.

Bezogen auf die verschiedenen politischen Ansatzpunkte (einen Überblick über verschiedene Optionen bietet Abbildung 2) steht die Entwicklung und Markteinführung neuer Kraftstoffe und Antriebskonzepte insbesondere in Zusammenhang mit entsprechenden Maßnahmen zur Förderung technologischer Forschung und Entwicklung, der Verteuerung herkömmlicher, fossiler Kraftstoffe (z.B. im Rahmen eines Emissionshandels oder durch Besteuerung) sowie mit Anreizen bzw. einer Verpflichtung zur Nutzung ausgewählter nachhaltiger Kraftstoffe.

Abb. 2 Optionen zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt



Quelle: nach Batteiger/Habersetzer 2022

Der Luftfahrtsektor ist geprägt von vergleichsweise langen Innovationszyklen (Kap. 6.2.2), hohen Markteintrittsbarrieren und großen Investitionssummen, sodass die Entwicklung und Zulassung neuer Technologien nicht selten mehr als zwei Jahrzehnte in Anspruch nehmen (Fücks et al. 2023). Zudem erfordert die angestrebte Transformation neben den notwendigen technologischen Entwicklungen zahlreiche weitere grundlegende Veränderungen auf allen Ebenen des Systems, etwa in der massiven Skalierung neuer Wertschöpfungsketten, der Transportlogistik für neue Kraftstoffe oder deren Handhabung an den Flughäfen. Entsprechend wird dem Staat bzw. den Institutionen der Europäischen Union bei der Ausgestaltung des regulativen Rahmens, bei Investitionen in die Infrastruktur sowie als Geldgeber etwa für FuE-Förderung eine sehr wichtige Rolle zugeschrieben, um eine klare politische Richtung vorzugeben, die Entwicklungszeitspannen im Interesse



Tab. 2 Vorgesehene Maßnahmen für einen Beitrag der Luftfahrt zum Klimaschutz

Maßnahme	Konkretisierung
Verbesserung der Effizienz im Flugzeug und disruptive Technologien	<ul style="list-style-type: none"> • Ausrichtung aller FuE-Instrumente der Bundesregierung auf Technologien, die einen Beitrag zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs bringen • Luftfahrtforschungsprogramm (Förderaufruf VI-3), fokussiert auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz • Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: Schwerpunkt Brennstoffzellensysteme für (kleine) Flugzeuge • BMDV Innovations- und Technologiezentrum Wasserstoff soll am Standort Nord Leistungen für H₂ und Brennstoffzellenanwendungen in der Luftfahrt anbieten.
Markthochlauf SAF	<ul style="list-style-type: none"> • konsequente Umsetzung der PtL-Roadmap (insbesondere Förderung von PtL-Kerosin) • ambitionierte Beimischungsquoten als Instrument zur Markteinführung • Fit-for-55-Dossiers mit Luftverkehrsbezug schnell auf EU-Ebene verabschieden • EU-EHS nutzen, um die Kostenlücke zwischen herkömmlichen Kraftstoffen und SAF zu schließen • staatliche Förderung von Pilotanlagen und Demonstratoren sowie von SAF-Produktionsanlagen im industriellen Maßstab • Ausbau internationaler Lieferbeziehungen von SAF • staatliche Förderung von Power-to-X-Labs (BMWK)
Flughäfen sollen klimaneutral werden	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung eines klimafreundlichen Flughafenbetriebs • Förderung klimafreundlicher Bodenstromanlagen • Unterstützung des Ausbaus der Elektromobilität auf dem Vorfeld und in Parkhäusern bzw. auf Parkplätzen • Unterstützung der Erschließung von Photovoltaik-Potenzialen an Flughäfen
weitere geplante Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Bis zur europäischen Entscheidung über die Einführung einer Kerosinsteuer soll auch europaweit eine Luftverkehrsabgabe erhoben werden (wie in Deutschland). • Unterstützung der Umsetzung bzw. Erreichung europäischer und internationaler Maßnahmen und Zielsetzungen (EU-EHS, CORSIA, weitere Langfristziele für den internationalen Luftverkehr)

Quelle: Bundesregierung 2022

des Klimaschutzes möglichst kurz zu halten und ein stabiles Investitionsumfeld zu schaffen. Hinzu kommt, dass nach Einschätzung von Expert/innen die Politik eine wichtige Rolle bei der Entscheidung spielen wird, welchen Branchen knappe Ressourcen wie grüner Wasserstoff bzw. auf Basis von grünem Wasserstoff hergestellte synthetische Kraftstoffe wie E-Fuels primär zur Verfügung gestellt werden sollen (Interviews Cames u. Kasten). Vor diesem Hintergrund ist es laut Einschätzung der aktuellen deutschen Bundesregierung entscheidend, dass zentrale Weichen etwa zur (Weiter-)Entwicklung alternativer Antriebe oder für den Markthochlauf neuer Kraftstoffe so schnell wie möglich gestellt werden (Bundesregierung 2022).



3.2 Politische Zielsetzungen und Strategien für eine klimaneutrale Luftfahrt

Eine wichtige Grundlage für die Reduzierung der Emissionen des inländischen Luftverkehrs ist das Bundes-Klimaschutzgesetz¹⁶, das zur Klimaneutralität bis 2045 verpflichtet. Ausgangspunkt dieser Zielsetzung ist die Verpflichtung Deutschlands durch das Übereinkommen von Paris aufgrund der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, wonach der „Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen ist, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels so gering wie möglich zu halten.“ Der zivile inländische Luftverkehr wird im Bundes-Klimaschutzgesetz im Verkehrssektor subsumiert. Als Zielvorgabe für den Verkehrssektor insgesamt sollen bis 2030 die CO₂-Äquivalente von 150 auf 85 Mio. t gesenkt werden. Allerdings ist der innerdeutsche Luftverkehr nur für einen geringen Anteil der Emissionen aus dem deutschen Luftverkehr insgesamt verantwortlich. Laut Schätzungen des Öko-Instituts (Siemons et al. 2021, S.4) sind nur ca. 6 % der Emissionen aus dem deutschen Luftverkehr insgesamt auf innerdeutsche Flüge zurückzuführen; 94 % entstehen durch Flüge (inklusive Tankvorgänge) in andere Länder, davon ca. ein Viertel durch Flüge in andere EU-Staaten, was die Bedeutung von europäischen bzw. internationalen Regelungen unterstreicht.

Die Europäische Union hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen und bis 2030 mindestens 55 % der Treibhausgase – im Vergleich zum Stand 1990 – einzusparen. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Fit-für-55-Maßnahmenpakete entwickelt. Beispielsweise wird angestrebt, den Ausbau erneuerbarer Energienkapazitäten deutlich zu beschleunigen, um 2030 bereits 45 % des Bruttoendverbrauchs durch erneuerbare Energien zu decken. Um einen entsprechenden Beitrag des Luftverkehrs zur Erreichung der Klimaschutzziele zu ermöglichen, haben sich EU-Kommission, EU-Rat und EU-Parlament auf verschiedene Maßnahmen geeinigt, die insbesondere den EU-Emissionshandel verschärfen und die Nutzung von SAF¹⁷ anreizen sollen (Rat der EU 2023a; Scheelhaase et al. 2023).

Die ICAO hat 2022 für ihren Geltungsbereich das Ziel beschlossen, bis 2050 netto keine CO₂-Emissionen mehr auszustoßen (Mithal/Rutherford 2023). Nicht-CO₂-Effekte werden darin allerdings nicht berücksichtigt. Ebenfalls sind keine Meilensteine,

16 Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12.12.2019, zuletzt am 18.8.2021 geändert

17 Die SAF-Terminologie wurde von der ICAO unter CORSIA übernommen und die übrige Branche stellt sich auf die neue Terminologie ein. Der wissenschaftliche Teil der Luftfahrtgemeinschaft bezeichnet diese Kraftstoffe in der ASTM D7566 als „Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“ und konzentriert sich dabei lediglich auf die technischen Aspekte der Kraftstoffe und nicht auf das Konzept der Nachhaltigkeit. SAF wird manchmal auch als Biojet, erneuerbarer Jet, Biokerosin, alternativer Flugkraftstoff, nicht konventioneller Flugkraftstoff etc. bezeichnet oder speziell unter den verschiedenen Bezeichnungen für die in ASTM D7566 beschriebenen Umwandlungswege (z.B. HEFA). Jeder SAF, der die Anforderungen der Norm D7566 erfüllt, wird als herkömmlicher Flugkraftstoff auf Erdölbasis anerkannt, der nach ASTM D1655 zugelassen ist (CAAFI o.J.)



etwa für 2030 oder 2040, definiert und auch keine nationalen oder regionalen Zielsetzungen.

3.2.1 Aktivitäten der deutschen Bundesregierung

Im Koalitionsvertrag der deutschen Bundesregierung von 2021 ist die Zielsetzung beschrieben, dass Deutschland „Vorreiter beim CO₂-neutralen Fliegen werden [solle] bei Wahrung von fairen Rahmenbedingungen im internationalen Wettbewerb“. Angestrebt wird ein „wirksamer Klimaschutz im Luftverkehr, der Emissionen effektiv reduziert sowie Carbon Leakage vermeidet“. Zudem wird spezifiziert, dass Einnahmen aus der Luftverkehrssteuer für die „Förderung von Produktion und Einsatz von CO₂-neutralen strombasierten Flugkraftstoffen sowie für Forschung, Entwicklung und Flottenmodernisierung im Luftverkehr“ eingesetzt und „ambitionierte Quoten für PtL im Luft- und Schiffsverkehr“ für einen raschen Markthochlauf angereizt werden sollen (SPD et al. 2021).

Aufbauend auf dem Koalitionsvertrag, spezifiziert ein gemeinsames Strategiepapier der Bundesregierung¹⁸ die inhaltlichen Schwerpunkte und konkreten Maßnahmen, mit denen erreicht werden soll, dass die Luftfahrt einen angemessenen Klimaschutzbeitrag leisten kann. Damit soll die Hochtechnologie des Luftfahrtsektors „im Sinn des Umwelt- und Klimaschutzes“ fortentwickelt und „auf die veränderte Zielsetzung nach nachhaltiger Mobilität im Rahmen des Pariser Klimaabkommens“ ausgerichtet werden (Bundesregierung 2022, S.1). Zudem wird bekräftigt, dass auch Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs berücksichtigt werden müssen (Bundesregierung 2022, S.2).

Die folgenden inhaltlichen Schwerpunkte werden im gemeinsamen Strategiepapier genannt:

- europäische und internationale Instrumente zur CO₂-Bepreisung des Luftverkehrs
- Maßnahmen der Technologieförderung für weitere Effizienzsteigerungen und für die schnelle Weiterentwicklung neuer und disruptiver Antriebe
- Fördermaßnahmen zum schnellen Markthochlauf und zur Bereitstellung von SAF, darunter CO₂-neutrale strombasierte Flugkraftstoffe (PtL)
- Maßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen an Flughäfen
- regulatorische und fiskalische Maßnahmen auf nationaler, europäischer und globaler Ebene zur Erreichung der Klimaneutralität der Luftfahrt

18 Die folgenden bestehenden politischen Strategien werden als Grundlage für das Strategiepapier der Bundesregierung genannt:

- PtL-Roadmap für den Luftverkehr von Bund, Ländern und Industrievertretern
- Leipziger Statement zur Zukunft der Luftfahrt 2019
- nationale Verpflichtungen und Nationale Wasserstoffstrategie
- europäische Verpflichtungen und Fit-for-55-Paket der Europäischen Kommission
- internationale Verpflichtungen im Rahmen von ICAO und UNFCCC



Im Rahmen der aktuellen Finanz- und Haushaltsplanung strebt die Bundesregierung an, die in Tabelle 2 genannten Maßnahmen umzusetzen.

Zur weiteren Diskussion und Koordination mit der Branche wurde unter Leitung des BMWK und BMDV der Arbeitskreis klimaneutrale Luftfahrt etabliert, der Unternehmen, Verbände sowie Akteure aus Forschung und Zivilgesellschaft umfasst.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen des Strategiepapiers fußen auf bestehenden Dokumenten wie insbesondere der PtL-Roadmap der Bundesregierung (2021) und der Nationalen Wasserstoffstrategie (Bundesregierung 2020 u. 2023). Die PtL-Roadmap der Bundesregierung konzentriert sich dabei ausschließlich auf nachhaltige strombasierte Kraftstoffe auf Basis von grünem Wasserstoff.¹⁹ Neben dem Ziel, den zukünftigen Bedarf durch E-Fuels für den Luftverkehr zu decken, steht auch das Streben nach dem Aufbau von entscheidendem Industrie-Know-how und die Erlangung einer Technologieführerschaft in der Herstellung und beim Einsatz von nachhaltig erzeugtem PtL-Kerosin im Mittelpunkt (Bundesregierung 2021). In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird u.a. dargelegt, dass der Luftverkehr auf „absehbare Zeit auf Flüssigkraftstoffe angewiesen“ und der Einsatz von SAF notwendig sein wird. Eine Verpflichtung der „Inverkehrbringer zum Einsatz strombasierter Flugkraftstoffe“ auf Basis von grünem Wasserstoff wird als sinnvoll beschrieben. Um einen raschen Markthochlauf zu ermöglichen, wurde daher 2021 für den Luftverkehr eine energetische Quote (für in Deutschland getanktes Kerosin) für die Nutzung von PtL-Kerosin für 2026 von 0,5 %, für 2028 von 1 % und für 2030 von 2 % beschlossen. Um einen raschen Markthochlauf der Produktion zu ermöglichen, wird auch die Bedeutung an der Mitarbeit internationaler Standardisierungen für verkehrliche Anwendungen für die „Lagerung, den Transport und den Einsatz von Wasserstoff und seinen Derivaten“ unterstrichen. Zukünftig soll ein „Masterplan für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ erstellt werden, um die Skalierung der Produktion von Wasserstoff und daraus hergestellten Kraftstoffen sowie die damit verbundene Infrastruktur voranzutreiben. Es soll etwa die „Unterstützung des Aufbaus einer initialen Betankungsinfrastruktur für Flüssigwasserstoff“ geprüft werden (Bundesregierung 2023).

Zentrale Programme der FuE-Förderung sind etwa das „Luftfahrtforschungsprogramm“ (LuFo des BMWK sowie das „Nationale Innovationsprogramm“ (NIP) des BMDV (Kap. 4.1). Zudem adressiert das BMDV mit dem Programm „Erneuerbare Kraftstoffe“ durch gezielte Förderung die technischen Herausforderungen des Markteintritts und der Anlagenskalierung für regenerative Kraftstoffe. Dies geschieht durch die technologieoffene Förderung der Entwicklung regenerativer Kraftstoffe, durch die Förderung einer Entwicklungsplattform für strombasierte Flüssigkraftstoffe, durch die Unterstützung von Investitionen in Erzeugungsanlagen für erneuerbare

¹⁹ Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse und der Nutzungskonkurrenz durch andere Sektoren wird Biomasse dort nicht thematisiert.



Kraftstoffe sowie zur Ermöglichung des Markthochlaufs von strombasiertem Kerosin.²⁰

3.2.2 Aktivitäten der Europäischen Union

Mit Blick auf den politisch-regulativen Rahmen ist die europäische Perspektive von großer Bedeutung. Das Maßnahmenbündel reicht vom EU-EHS über den Entwurf der ReFuelEU-Aviation-Verordnung zur verpflichtenden Beimischung von SAF sowie der Förderung der Produktion und Nutzung von SAF bis hin zur Initiative „Single European Sky“ zur Flugroutenoptimierung und weiteren betrieblichen Verbesserungen (EK 2021a). Auf Basis der Vorschläge der Europäischen Kommission vom Juli 2021 im Rahmen des Fit-für-55-Pakets einigten sich die Kommission, der Europäischer Rat und das Europäische Parlament im Trilog auf neue bzw. verschärfte Klimaschutzregeln für den europäischen Luftverkehr. Durch die beschlossenen Regelungen werden insbesondere der europäische Emissionshandel verschärft und Anreizmaßnahmen zur Nutzung von SAF geschaffen (Rat der EU 2023a; Scheelhaase et al. 2023).

Europäischer Emissionshandel

Der europäische Emissionshandel ist ein zentrales Instrument zur nachhaltigen Transformation des europäischen Flugverkehrs. Seit 2012 ist der innereuropäische Luftverkehr in den EU-EHS einbezogen, nachdem bereits 2010 die Pflicht zum Monitoring der verursachten Emissionen eingeführt worden war. Das heißt, die Luftfahrzeugbetreiber müssen Emissionszertifikate in Höhe ihrer durch alle innerhalb des EWR verursachten und verifizierten Kohlendioxidemissionen abgeben. Die Regelung

²⁰ <https://erneuerbarekraftstoffe.de/gesamtkonzept/> (3.4.2024)



betrifft alle Luftfahrzeugbetreiber, auch solche, die ihren Geschäftssitz außerhalb der Europäischen Union haben. Die Abgrenzung der in den EU-EHS einbezogenen Luftverkehrsemissionen legt die Richtlinie 2003/87/EG²¹ (Emissionshandelsrichtlinie) fest (DEHSt 2022).

Laut Einigung von EU-Kommission, -Rat und -Parlament bleibt die Begrenzung des EHS auf den EWR sowie auf Flugverbindungen zwischen EWR und Großbritannien und der Schweiz auch zukünftig bestehen. Flüge von oder nach außerhalb dieses Gebiets sollen dagegen durch das „Carbon Offsetting and Reduction Scheme“ (CORSIA) der ICAO abgedeckt werden (EK 2022; Scheelhaase et al. 2023).

Ab 2026 soll es für den europäischen Emissionshandel keine kostenlose Zuteilung von Emissionszertifikaten an Luftfahrzeugbetreiber mehr geben. Vorher wird diese kostenlose Zuteilung bereits schrittweise deutlich gesenkt, ab 2024 um 25 % und ab 2025 um 50 %. In ihrem Entwurf zur Überarbeitung der Emissionshandelsrichtlinie vom Juli 2021 im Rahmen des Fit-für-55-Pakets schlägt die EU-Kommission zudem vor, ab 2024 die jährliche Gesamtmenge der verfügbaren Emissionen des Flugverkehrs um 4,2 % jährlich zu senken (Graichen 2021).

Um die Mehrkosten für die Luftfahrzeugbetreiber abzufedern, die durch die Nutzung von SAF entstehen, und einen zusätzlichen Anreiz zur Nutzung von SAF zu geben, werden bis 2024 allerdings 20 Mio. t zusätzlicher Emissionsrechte ausgegeben (Scheelhaase et al. 2023). Laut Kommission können durch die zukünftige Versteigerung der Emissionsrechte finanzielle Mittel von schätzungsweise 1,6 Mrd. Euro realisiert werden, die etwa für die Investition in die Nutzung von SAF investiert werden können (EK 2022). Insgesamt ist durch diese Entwicklung mit höheren Kosten der Fluggesellschaften und ggf. mit einer Steigerung der Ticketpreise zu rechnen (Scheelhaase et al. 2023).

Um perspektivisch die Einbeziehung von Nicht-CO₂-Effekten zu ermöglichen, soll ab 2025 eine MRV-Pflicht (Monitoring, Reporting, Verification) eingeführt werden, also eine festgeschriebene Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung der eigenen verursachten Nicht-CO₂-Effekte (Scheelhaase et al. 2023). Dies gilt als wichtiger erster Schritt, um zum einen öffentlichkeitswirksame Transparenz herzustellen und zum anderen die Grundlage zu schaffen, Nicht-CO₂-Effekte mit einem Preis für die Verursacher versehen zu können.

Der EU-EHS gibt damit einen klaren politischen Kurs in Richtung eines möglichst klimaneutralen europäischen und internationalen Flugverkehrs vor. Jedoch wird seine preisliche Steuerungswirkung allein als nicht ausreichend für ein rechtzeiti-

21 Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates



ges Umsteuern angesehen, sondern als ein zentrales Element in einem Konstrukt aus verschiedenen regulativen und fördernden politischen Maßnahmen (EK 2021a). Von großer Bedeutung für seine zukünftige Wirksamkeit ist dabei die erfolgreiche Einbeziehung von Nicht-CO₂-Effekten bzw. die Entwicklung von ergänzenden Instrumenten für deren Bepreisung und Reduzierung (Interviews Cames u. Grimme). Diese Einbeziehung von Nicht-CO₂-Effekten in den EU-EHS gilt als komplex, da es entsprechender Berechnungsmethoden bedarf, die etwa Trade-offs zwischen CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten berücksichtigen und damit die Nettoklimawirkung. Zudem ist einzubeziehen, dass die Klimawirkung von Nicht-CO₂-Effekten nicht linear zum Kraftstoffverbrauch erfolgt und von Emissionsort, Flughöhe und -zeitpunkt abhängig ist (Siemons et al. 2021).

ReFuelEU-Aviation-Verordnung

Eine weitere zentrale Maßnahme der EU-Kommission (EK 2021b) im Rahmen von „Fit für 55“ ist der Entwurf der ReFuelEU-Aviation-Verordnung, mit der das Ziel verfolgt wird, eine langfristige und verlässliche Marktentwicklung für SAF zu schaffen. Hierfür sieht der Verordnungsentwurf eine kontinuierlich steigende verpflichtende Beimischungsquote von SAF vor, die für Inverkehrbringer bzw. Anbieter von Flugkraftstoffen in der EU gilt. Diese soll von mindestens 2 % im Jahr 2025 in 5-Jahresschritten auf mindestens 70 % im Jahr 2050 steigen (Rat der EU 2023b). Zudem soll die Verordnung eine Unterquote für Kraftstoffe aus nicht biologischen Quellen enthalten, worunter E-Fuels fallen (Graichen 2021). Laut der Einigung des Trilogs vom 16. Juni 2023 soll diese Unterquote für E-Fuels ebenfalls in 5-Jahresschritten von mindestens 1,2 % 2030 auf mindestens 35 % im Jahr 2050 ansteigen (BMWK 2023). Vormalig war Deutschland das erste europäische Land, das eine derartige verbindliche Quote gesetzlich geregelt hatte. Damit dieser vorgehaltene Flugkraftstoff auch in ähnlichem Umfang tatsächlich verbraucht wird, sieht der Verordnungsentwurf eine Tankpflicht für jeden Flug von einem EU-Flughafen aus vor. Auf diese Weise soll das Tankering vermieden werden, also das vermeintlich preisgünstigere Tanken außerhalb von EU-Flughäfen. Luftfahrzeugbetreiber werden verpflichtet, 90 % des durchschnittlich pro Jahr verbrauchten Treibstoffs in der EU zu tanken. Um dies möglich zu machen, sollen Flughäfen verpflichtet werden, die entsprechende Infrastruktur bereitzustellen (EK 2021b; Scheelhaase et al. 2023). In der Abstimmung zwischen EU-Rat und -Parlament wurde der Kommissionsvorschlag dergestalt ergänzt, dass die Anwendung von Wasserstoff und synthetischen CO₂-armen Flugkraftstoffen sowie bestimmten zertifizierten Biokraftstoffen ermöglicht wird, die konform sind mit den Nachhaltigkeits- und Emissionsreduktionskriterien der Richtlinie (EU) 2018/2001 (Neufassung)²² (Erneuerbare-Energien-Richtlinie). Explizit ausgenommen sind Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen (Rat der EU 2023a).

22 Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)



Mit der aktuellen Fassung der Verordnung wird zudem dem Umstand Rechnung getragen, dass eine Reduzierung der Aromaten- und Schwefelanteile im Kerosin zur Minderung der Nicht-CO₂-Effekte beitragen kann. Mit einem vorgesehenen Monitoring des Schwefel- und Aromatengehalts im Kerosin kann ermittelt werden, welchen Effekt auf das Klima ein verringerter Anteil von Schwefel und Aromaten hat. Eine verpflichtende Reduzierung dieser Anteile kann zur Verringerung der klimaschädlichen Nicht-CO₂-Effekte beitragen (EK 2020). Entsprechende Obergrenzen können auf Grundlage der Monitoringergebnisse festgelegt werden.

Erneuerbare-Energien-Richtlinie

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie definiert u.a. das Ausbauziel der EU für erneuerbare Energien. Mit der aktuellen Novelle ist vorgesehen, dass dieses Ziel von bisher 32 auf 45 % im Jahr 2030 deutlich steigen wird. In diesem Zusammenhang werden auch die Zielvorgaben etwa für den Verkehrssektor zur Nutzung erneuerbarer Energien erhöht.

Im Hinblick auf die Herstellung von Flugkraftstoffen schreibt die Erneuerbare-Energien-Richtlinie vor, welche Kriterien hinsichtlich der Nachhaltigkeit des Strombezugs für diese Herstellungsprozesse einzuhalten sind. Beispielsweise wurde bezüglich der Anrechnung von kohlenstoffarmen Kraftstoffen (Low Carbon Fuels) wie etwa Wasserstoff auf Basis von Atomstrom entschieden, dass diese nicht auf die EE-Ziele angerechnet werden können (BMWK 2023). Ebenfalls wird die Treibhausgasminde rung definiert, die durch den Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen zu erreichen ist (Bundesregierung 2021).





3.2.3 Internationale Aktivitäten

Weitet man die Perspektive über die Europäische Union hinaus, so stellt sich die Frage, wie auf internationaler Ebene ebenfalls ein sinnvoller Modus gefunden werden kann, um die Klimawirkungen des Luftverkehrs wirksam zu reduzieren und gleichzeitig einen fairen Wettbewerb derart zu ermöglichen, dass Fluggesellschaften aus Staaten und Regionen, die bei der Regulierung zur Reduzierung von Klimawirkungen voranschreiten, keine übermäßigen wirtschaftlichen Nachteile entstehen. Aus Industrieperspektive wird angemahnt, dass „außereuropäische Airlines häufig unter weniger restriktiven Bedingungen fliegen“ und damit zu rechnen ist, „dass internationale Flüge zunehmend über Drehkreuze außerhalb Europas abgewickelt werden“, sollte die regulative Belastung zu entsprechenden Kostennachteilen für hiesige Fluglinien führen (Fücks et al. 2023). Dieser Carbon-Leakage-Effekt könnte dazu führen, dass CO₂-Einsparungen europäischer Airlines durch steigende Emissionen von Nicht-EU-Airlines überkompensiert werden (Fücks et al. 2023). Wie groß die Gefahr eines solchen Carbon Leakage für europäische Fluglinien bzw. Flugrouten tatsächlich ist, ist unter Expert/innen jedoch umstritten (Interviews Cames u. Grimme).

Grundsätzlich kann es jedoch als wichtig angesehen werden, möglichst vergleichbare Regelungen für effektiven Klimaschutz auf europäischer und auf internationaler Ebene zu schaffen und dadurch einen fairen Wettbewerb zu gewährleisten. Andernfalls besteht die Gefahr, dass Fluggesellschaften aus Drittstaaten, die sich nicht an die erforderlichen deutschen oder europäischen Voraussetzungen zur Einhaltung der Klimaschutzziele halten, hierdurch Wettbewerbsvorteile erhalten. Laut Bundesregierung sollen Luftverkehrsabkommen mit Drittstaaten ohne entsprechende Regelungen zur Einhaltung der Klimaschutzziele sicherstellen, dass Luftfahrtunternehmen aus diesen Ländern „beim Einflug in die Bundesrepublik Deutschland die geltenden jeweiligen nationalen und europäischen umweltschutzrechtlichen Vorschriften einzuhalten haben“ (Bundesregierung, S.8).

CORSIA

Da Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr nicht Teil des internationalen UNFCCC-Climate-Regimes sind, haben die Mitgliedsstaaten der ICAO 2016 beschlossen, ein marktbasierendes System zur Kompensation von CO₂-Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr einzuführen. Der Ansatz lautet, dass Fluglinien und andere Flugzeugbetreiber alle CO₂-Emissionen kompensieren, die über dem Ausgangsniveau von 2020 liegen. Das heißt, bilanziell soll das Emissionsniveau von 2020 zunächst eingefroren werden, bis es durch den Einsatz von SAF und anderen technologischen Innovationen gesenkt werden kann. Es wurden zwei freiwillige (Test-) Phasen vereinbart, von 2021 bis 2023 und von 2024 bis 2026. Ab 2027 soll CORSIA dann verbindlich für die Mitgliedsstaaten sein (ICAO 2022, S.225 ff.).



Flüge innerhalb des EWR und im EWR abgehende Flüge nach Großbritannien und in die Schweiz unterliegen dem europäischen Emissionshandel, wogegen Flüge von bzw. nach außerhalb des EWR durch CORSIA abgedeckt sind. Dabei erfolgt die Umsetzung von CORSIA über die EU „zur schnellen und einheitlichen Umsetzung für alle Mitgliedstaaten“. Ebenfalls wurden die „Monitoring-Methoden für den EU-EHS und für CORSIA angeglichen, damit Luftfahrzeugbetreiber für beide Systeme nur ein einheitliches Monitoringkonzept vorweisen müssen (DEHSt 2022).

Grundsätzlich bestehen jedoch erhebliche Zweifel an der Wirksamkeit von CORSIA, etwa aufgrund der mangelnden Qualität von nachzuweisenden Offsetsertifikaten, verglichen mit geltenden Standards des EU-EHS (Interview Cames). Für 2026 hat sich die EU-Kommission daher vorgenommen zu überprüfen, „ob CORSIA ein effektives Instrument zur Begrenzung der Klimawirkung des Luftverkehrs ist“. Falls nicht, besteht die Möglichkeit, den Anwendungsbereich des EU-EHS auch auf Flüge außerhalb des EWR auszuweiten. Flüge von und nach Ländern, die bis 2027 nicht an CORSIA teilnehmen, sollen „unabhängig davon im EU-EHS teilnahmespflichtig werden“ (EK 2021a; Graichen 2021; Scheelhaase et al. 2023).

Ausblick USA/IRA

Mit dem „Inflation Reduction Act“ haben die USA sehr ambitionierte Ziele für die Einführung von SAF beschlossen und entsprechende Förderungen in Form von Steuergutschriften auf den Weg gebracht. Ziel ist es, auf nationaler Ebene bis 2050 sämtliche herkömmliche Flugkraftstoffe durch SAF zu ersetzen (ca. 130 Mrd. l jährlich). 2030 soll die jährliche Produktion von SAF bereits 12 Mrd. l umfassen (ICAO 2022). Diese neue Steuergutschrift für SAF „beginnt bei 1,25 US-Dollar pro Gallone (ca. 3,79 l) für nachhaltige Kraftstoffe, welche eine 50%ige Reduzierung der THG-Emissionen im Vergleich zu fossilem Kerosin erreichen“ (BDL 2022b). Für jeden weiteren Prozentpunkt der Reduzierung der THG-Emissionen wird zusätzlich 1,0 Cent pro Gallone gezahlt (bei einer Gesamtbegrenzung auf 1,75 US-Dollar pro Gallone) (BDL 2022b). Das heißt, je mehr CO₂ durch die produzierten Kraftstoffe eingespart wird, desto höher liegt die Förderung. Auf diese Weise sollen die deutlich höheren Produktionskosten ohne Wettbewerbsverzerrung ausgeglichen werden (Fücks et al. 2023). Vonseiten der europäischen Industrie werden entsprechend Befürchtungen geäußert, dass eine derartig massive Förderung die europäischen Bemühungen, eine großskalige Produktion von SAF aufzubauen, unterminieren könnte, da Unternehmen und Investoren ggf. in die USA abwandern könnten (airliners.de 2023). Vor diesem Hintergrund ist es für Deutschland und Europa sehr wichtig, synthetische Kraftstoffe mit staatlicher Unterstützung möglichst schnell in den Markt zu bringen, sodass rasch eine Nachfrage entsteht und die Produktion von SAF weiter angereizt wird. Hierbei spielen öffentliche Förderungen sowie Unterstützungen bei der Finanzierung eine Rolle, aber auch beispielsweise die rasche Umsetzung entsprechender Regulierungen und EU-Richtlinien nationaler Ebene (Beyers 2023).



4 Innovationssystem der deutschen Luftfahrt

Das Innovationssystem der Luftfahrt in Deutschland besteht aus einer Vielzahl national und international vernetzter Akteure. Ein wesentlicher Bestandteil für die Innovationsfähigkeit ist die Technologieförderung auf Bundes- und Landesebene. Im Zeitablauf hat sich ein vielfältiges Innovationsökosystem entwickelt, das alle Wertschöpfungsstufen und Technologiebereiche der Luftfahrt abdeckt. Eine besondere Rolle spielen dabei Clusterinitiativen, in denen Ausbildung/Qualifizierung, FuE-Aktivitäten sowie der Transfer von der Theorie in die Praxis vorangetrieben werden.

4.1 Technologieförderung der Luftfahrt in Deutschland

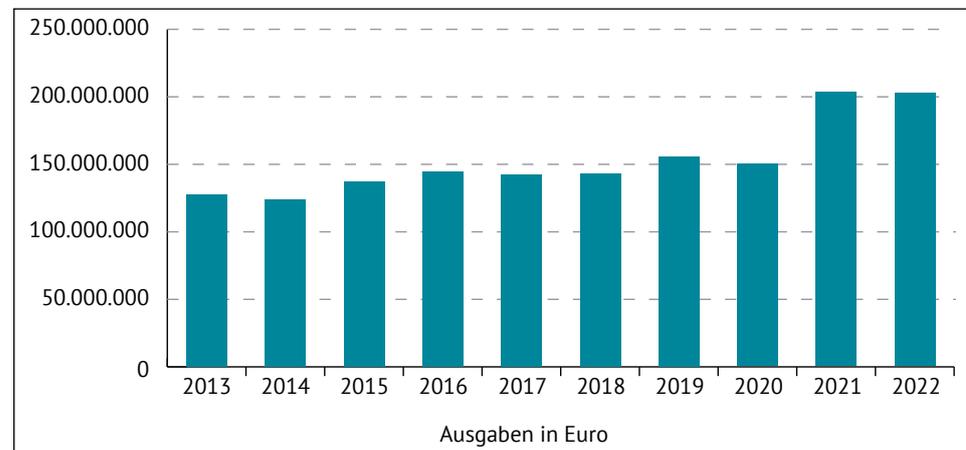
Das LuFo ist das zentrale Instrument zur Förderung von Forschungs- und Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt am Standort Deutschland. Ziel des LuFo ist es, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie durch Technologieförderung zu stärken. Mit dem LuFo werden Projekte in verschiedenen Themenbereichen wie z.B. alternative Antriebe, Flugzeugsysteme, Flugführung, Flugsicherheit oder Klimaschutz gefördert. Das Programm ist in mehrere Aufrufe unterteilt, die jeweils unterschiedliche Schwerpunkte und Förderbedingungen haben. Der aktuelle Aufruf (LuFo VI-3) konzentriert sich auf klimaverträgliche Luftfahrt. Konkret unterstützt das BMWK in der aktuellen Periode des LuFo von 2020 bis 2024 Forschungs- und Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt am Standort Deutschland, die zur Entwicklung eines nachhaltigen, wirtschaftlichen und effizienten Lufttransportsystems der Zukunft beitragen (DLR o.J.b). Dem Thema Nachhaltigkeit und dem Einfluss auf den Klimaschutz wird bei der Auswahl der geförderten Projekte großes Gewicht beigemessen und es wurden erstmals konkrete Zielwerte des Programms für 2035 festgeschrieben (DLR o.J.b). Außerdem fördert das BMWK die Beschaffung eines Regionalflugzeugs sowie dessen Umrüstung und Nutzung als fliegender Wasserstoffprüfstand, um die Erprobung von Wasserstoff in der Luftfahrt voranzutreiben (DLR 2023).

Die Analyse der Forschungsförderung von Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt (Förderung von Einzelvorhaben; Abb. 3) allein des BMWK zeigt, dass sich das Niveau der Förderung von 2016 bis 2020 relativ konstant bei ca. 150 Mio. Euro befand und seit 2021 ein deutlicher Anstieg auf ca. 200 Mio. Euro zu verzeichnen ist.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Studie (September 2023) lief eine Evaluation des LuFo, deren Ergebnisse noch nicht vorlagen (ISG o.J.). Die letzte verfügbare Evaluation des LuFo stammt von 2019 und bei der die Wirkungen und der Nutzen des Programms untersucht wurden. Die Evaluation zeigte im Ergebnis, dass das LuFo einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie leistet und positive Effekte auf die Produktion, die Bruttowertschöpfung und die Beschäftigung hat. Die Evaluation führte auch zu



Abb. 3 Forschungsförderung von Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt – Förderung von Einzelvorhaben des BMWK



Quelle: Bundesministerium der Finanzen (www.bundeshaushalt.de; 14.7.2023)

einigen Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung des LuFo, darunter die stärkere Einbindung von kleinen und mittleren Unternehmen, die Erhöhung der Transparenz und die Intensivierung der Kommunikation sowie die Anpassung der Förderbedingungen an die Bedürfnisse der Branche (Wangler et al. 2019).

Bundesregierung und Bundesländer fördern zahlreiche Maßnahmen, die eine Entwicklung der klimaneutralen Luftfahrt unterstützen.

Die Bundesregierung unterstützt darüber hinaus die Luftfahrtindustrie mit einer Vielzahl weiterer Fördermaßnahmen. Das BMDV beispielsweise fördert Forschung und Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie im Verkehrsbereich einschließlich der Luftfahrt im Rahmen des NIP. Im NIP wird sich dabei auf die technische Machbarkeit bis hin zur Marktverfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen und Komponenten für kleine Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt konzentriert. Wenn Brennstoffzellen in Flugzeugen zum Einsatz kommen sollen, besteht eine Herausforderung darin, diese flugfähig zu machen, d.h., sie müssen an die sicherheitstechnischen Anforderungen von Flugzeugen angepasst und ihr Gewicht optimiert werden (Interview Belitz/Berndes). Das ITZ soll dementsprechend Leistungen für Wasserstoff- und Brennstoffzellenanwendungen in der Luftfahrt anbieten. Darüber hinaus unterstützt die Bundesregierung den Markthochlauf nachhaltig erzeugter Flugkraftstoffe und unterstützt die Flughäfen dabei, klimaneutral zu werden (BMDV 2022; Bundesregierung 2022).

Zudem spielen die Bundesländer eine wichtige Rolle bei der Technologieförderung der Luftfahrt in Deutschland, da sie die regionale Wirtschafts- und Innovationspolitik gestalten und die Standortbedingungen für die Luftfahrtindustrie beeinflussen können. Die Bundesländer verfügen zum Teil über eigene Förderprogramme für die Luftfahrtforschung, die sich an den spezifischen Bedarfen und Stärken der jeweiligen Regionen orientieren und oft eine Ergänzung oder Voraussetzung für die Bun-

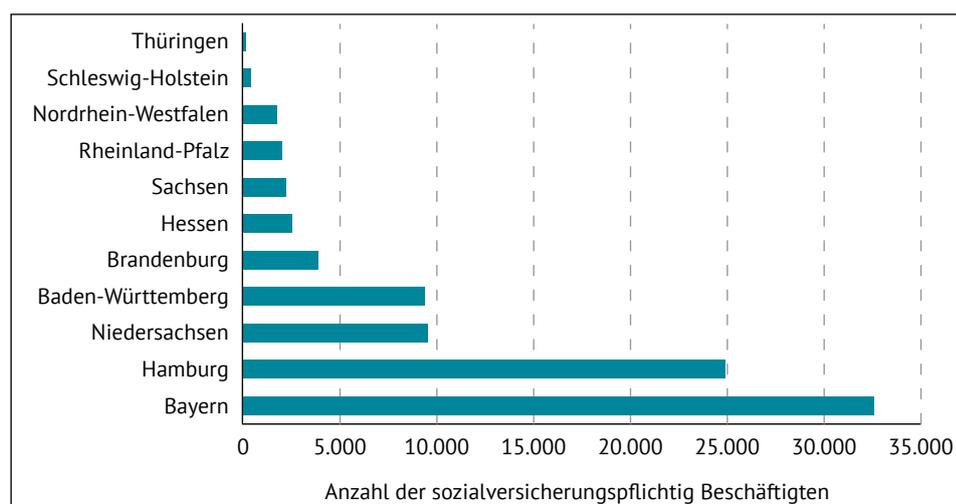


desförderung darstellen. Die Bundesländer kooperieren auch untereinander oder mit anderen europäischen Regionen im Rahmen von Netzwerken oder Initiativen wie z.B der „European Aerospace Cluster Partnership“ oder dem „Clean Sky Joint Undertaking“. Die Bundesländer sind zudem an der Umsetzung der nationalen Luftfahrtstrategie beteiligt, die eine enge Abstimmung zwischen Bund, Ländern und Industrie vorsieht.

4.2 Hotspots der Luftfahrtindustrie in Deutschland: Zahlen und Fakten zu Beschäftigten und Schwerpunkten

Der Umsatz der Luft- und Raumfahrtindustrie in Deutschland unterlag in den vergangenen Jahren starken Schwankungen. Nachdem der Umsatz der Branche 2019 noch bei 32 Mrd. Euro gelegen hatte, ging er 2020 und 2021 auf ca. 22 Mrd. Euro zurück, lag aber 2022 bereits wieder bei 28 Mrd. Euro (BDLI 2023). Die Systemhersteller in Deutschland waren nach Angaben des Branchenverbands ebenso wie die bundesweit beheimatete Zulieferkette massiv vom Einbruch des internationalen Reiseverkehrs und dem damit verbundenen niedrigen Bedarf an neuen Verkehrsflugzeugen betroffen. Die Beschäftigtenzahl in der zivilen Luftfahrt nahm um 4.000 auf 69.000 Beschäftigte ab. In der militärischen Luftfahrtindustrie wurde 2021 ein Umsatz von 7 Mrd. Euro bei gleichzeitig leichter Reduzierung der Beschäftigtenzahl um 4% von 22.900 auf 22.000 erzielt (BDLI 2021). 2022 stiegen die Zahlen wieder an, auf ca. 73.000 Beschäftigte in der zivilen sowie 23.000 in der militärischen Luftfahrtindustrie (BDLI 2023).

Abb. 4 Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte der Teilbranche 303 Luft- und Raumfahrzeugbau



Kategorisierung des Statistischen Bundesamtes zum Stichtag 30.6.2022; aus Datenschutzgründen liegen keine Daten für Sachsen-Anhalt, das Saarland, Mecklenburg-Vorpommern, Bremen und Berlin vor.

Quelle: Datenbank „Branchen im Fokus“ der Bundesagentur für Arbeit (26.5.2023)



Die Analyse der Beschäftigtenzahlen im Luft- und Raumfahrzeugbau (also insbesondere der Herstellung von Luftfahrzeugen) in Deutschland im Vergleich der Bundesländer zeigt, dass vor allem in Bayern, Hamburg, Niedersachsen und Baden-Württemberg regionale Cluster im Sinne einer hohen Konzentration von Beschäftigung in der Luftfahrtindustrie existieren (Abb. 4).

4.3 Die wichtigsten Clusterinitiativen im Kontext klimaneutralen Fliegens im Überblick

In den Regionen mit vielen Beschäftigten in der Luftfahrt in Deutschland gibt es mehrere relevante Clusterinitiativen, in denen die regionalen Akteure kooperieren. Diese Netzwerke bringen die regionalen Akteure aus Industrie, Wissenschaft und Politik zusammen und haben in der Regel einen Fokus darauf, kooperative und technologieorientierte Projekte zu initiieren. Somit spielen sie eine wichtige Rolle dabei, insbesondere die kleinen und mittleren Unternehmen zu unterstützen, innovativ zu sein und neue technologische Entwicklungen im Bereich klimaverträglicheres Fliegen in neue Produkte und Dienstleistungen umzusetzen. In Abbildung 5 sind die wesentlichen Clusterinitiativen in Deutschland abgebildet.

Hamburg ist einer der weltweit führenden Standorte für die zivile Luftfahrtindustrie. Hier arbeiten mehr als 41.000 Fachkräfte in der Luftfahrt.²³ Neben den beiden Branchenriesen Airbus und Lufthansa Technik sowie dem Flughafen Hamburg tragen über 300 kleine und mittlere Unternehmen sowie vielfältige technologisch-wissenschaftliche Institutionen zum Know-how bei.

In Bayern erwirtschaften rund 38.000 Beschäftigte in der Luft- und Raumfahrt einen Umsatz von ca. 11 Mrd. Euro. Damit gehören Bayern und Hamburg zu den Top 5 der Luft- und Raumfahrtstandorte weltweit.

Die Clustermanagementorganisationen decken dabei sehr vielfältige inhaltlich-technologische Themenschwerpunkte ab. Beispielhaft genannt seien Aktivitäten zur Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen, von Technologien zur Emissionsreduzierung und von nachhaltigen Kabineninnovationen sowie zur Digitalisierung der Lufttransportkette.

Die Clustermanagements unterstützen ihre Mitglieder dabei im Wesentlichen mit den folgenden Aktivitäten:

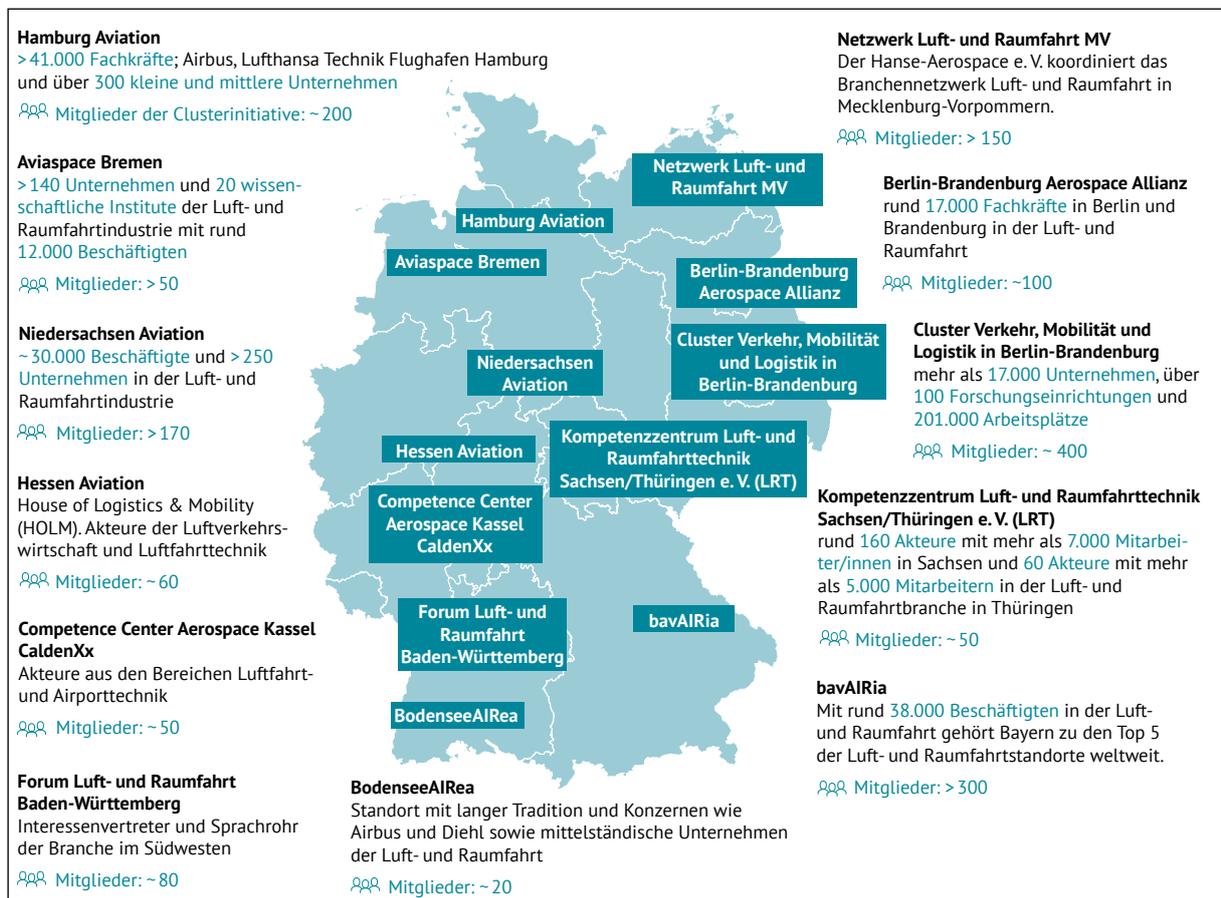
- Initiierung von Innovationsprojekten und Projektentwicklung
- Vernetzung der Akteure

²³ Dies geht über die rund 25.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten der Teilbranche 303 Luft- und Raumfahrzeugbau nach WZ 2008 in Abbildung 4 hinaus, da auch angrenzende Branchen mit direktem Bezug zur Luftfahrt mit einbezogen werden; Details zur Methodik Hamburg Aviation/iit o.J.



- Organisation von Fachveranstaltungen und Messen (gemeinsame Teilnahmen und Organisation ganzer Messen)
- Kommunikation von Projekterfolgen (Wissens- und Technologietransfer), Marketing- und Öffentlichkeitsarbeit
- Implementierung von Reallaboren oder Betreiben von Labs
- Organisation von Innovationswettbewerben
- Beratung zu fachspezifischen Fragen (Zertifizierungen, Markterkundung, Finanzierungslösungen)
- Kontakte zu Politik und Verwaltung (EU, Bund, Land, regional)
- Erfahrungsaustausch zwischen den Mitgliedern, Kontaktvermittlung

Abb. 5 Clusterinitiativen in der Luftfahrt in Deutschland



Eigene Darstellung auf Basis der Clusterplattform Deutschland (www.clusterplattform.de; 3.4.2024) und Informationen auf den einzelnen Seiten der Clusterinitiativen (30.5.2023)



Es zeigt sich, dass es in Deutschland viele etablierte Clusterinitiativen gibt, die die regionalen Akteure auf vielfältige Weise bei ihren Innovationsaktivitäten unterstützen. In der Regel werden diese Organisationen durch die öffentliche Hand (ko)finanziert, entweder durch die jeweiligen Landesministerien (beispielsweise bavAIRia in Bayern als Teil der Clusteroffensive Bayern, Hamburg Aviation als Verein, in dem der Senat Mitglied ist, oder LRT im Rahmen der Netzwerkförderung des Freistaats Sachsen) oder durch kommunale Akteure (beispielsweise BodenseeAIRia durch die regionale Wirtschaftsfördergesellschaft). Insbesondere die kleinen und mittleren Unternehmen sind dabei die Zielgruppe der Organisationen und profitieren sehr stark von den Angeboten.



5 Innovationsbereiche

Die wesentlichen Innovationsbereiche sind bei innovativen Kraftstoffen und Antriebskonzepten verortet. Dies wird vor allem deutlich, wenn die international verfügbaren wissenschaftlichen Publikationen sowie auf europäischer Ebene geförderte Forschungsprojekte analysiert werden. Die unterschiedlichen Innovationsbereiche sind durch verschiedene technologische Ansätze charakterisiert, wobei festzuhalten ist, dass keine einzelne Technologie allein prägend für eine klimaneutrale Luftfahrt sein kann. Daher spielen auch über Antriebskonzepte und Kraftstoffe hinausgehende Innovationsbereiche eine wichtige Rolle.

5.1 Technologiema­pping

Im Folgenden wird ein kompakter Überblick zum Forschungs- und Implementierungsstand wesentlicher Vorhaben in den Bereichen Kraftstoffe und Antriebskonzepte in der Luftfahrt gegeben, um die relevantesten aktuell verfügbaren und aufkommenden Innovationen in den beiden Bereichen zu erfassen.

5.1.1 Publikationsanalyse

Eine geeignete Datenquelle, um den aktuellen Stand der Technologien im Bereich klimaverträglicheres Fliegen zu analysieren, ist die Publikationsdatenbank Scopus.²⁴ Mit ihrer umfassenden Abdeckung von Millionen wissenschaftlicher Artikel und Konferenzbeiträgen bietet sie Zugang zu aktuellen Informationen der technologischen Entwicklung. Die regelmäßige Aktualisierung der Daten gewährleistet, dass sie die neuesten Entwicklungen innerhalb eines Technologiethemas abdeckt.

Diese Daten wurden mittels KI-gestützter Analyse untersucht. Hierfür wurde ein neuronales Netz angelernet, um die Gesamtdatenmenge nach relevanten Publikationen zu durchsuchen.²⁵ Dabei wurden weltweit fast 30.000 Dokumente identifiziert, welche einen thematisch relevanten Bezug haben. Sie wurden mittels Textminingverfahren analysiert und in verschiedene Schwerpunkte geclustert. Diese Cluster wurden durch Expert/innen geprüft und in Bezug auf die Relevanz für den Themenschwer-

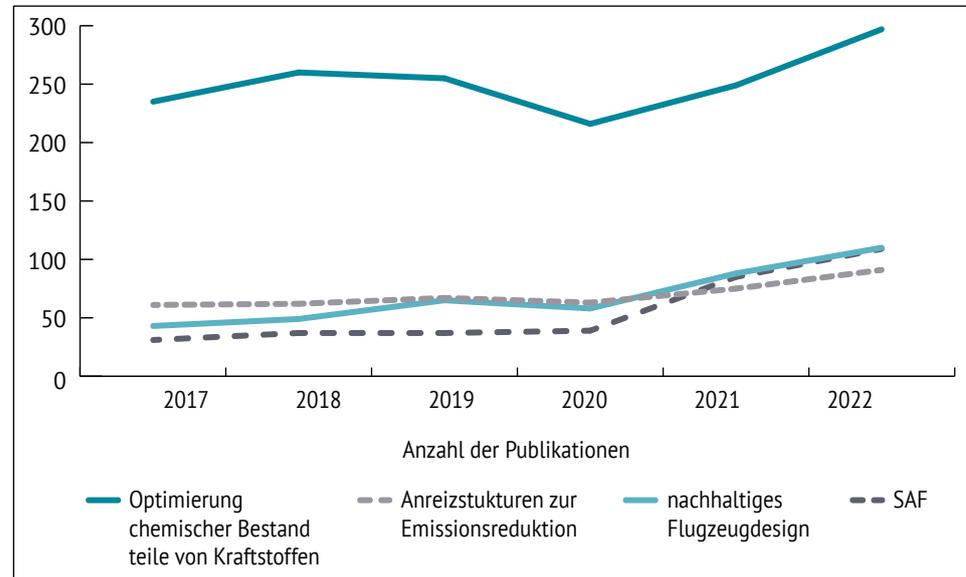
24 Scopus ist eine multidisziplinäre Literaturdatenbank, die einen (Voll-)Zugriff auf mehr als 75 Mio. Peer-Review-Fachartikel und Konferenzbeiträge aus Technik, Medizin, den Natur-, Sozial- sowie Kunst- und Geisteswissenschaften ermöglicht.

25 Dabei wurden folgende relevante Themenschwerpunkte definiert:

- engine, low-emmission, immitent technolog*, BETO, turbine, combustor operabilit*
- e-fuels, hydrogen-powered electrofuel, low-carbon fuel*, recycled carbon fuel*, lower carbon aviation fuel* low, power to liquid, sustainable aviation fuel, SAF, biojet, non-oil based, biofuel, renewable*, used cooking oil, hydrothermal liquefaction, hydroprocessed renewable jet, fresh fruit bunches, sewage sludge, steel off-gases, methanol to fuel, Fischer-Tropsch/FT-synthethis, wet/food waste-derived volatile fatty acids, solar, biomass, electrification, hydrogen, isoparaffin VFA-SAF, drop-in liquid fuels, hydrotreated esters and fatty acids, HEFA, thermofluid*, hydroprocessed fermented sugars to synthetic isoparaffin/HFS-SIP, HEFASPK, pyrolysis, hydrothermal liquefaction



Abb. 6 Weltweite Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens



Zeitraum: 2017–2023; n=2.774 Dokumente

Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

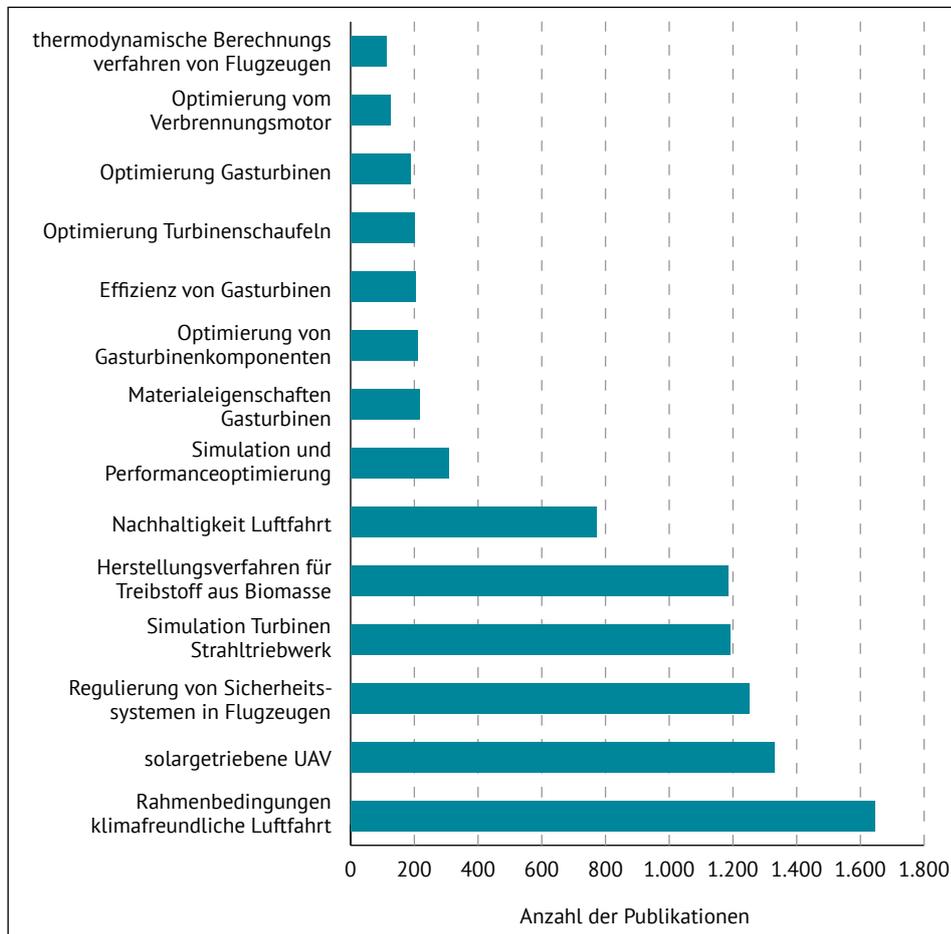
punkt dieser Studie hin bewertet. Im Ergebnis zeigen sich folgende Technologieschwerpunkte (Abb. 6), an denen weltweit geforscht wird.

Insbesondere die Optimierung chemischer Bestandteile von Kraftstoffen steht dabei im Fokus der Aktivitäten, oftmals mit einem Schwerpunkt auf der Nutzung von Wasserstoff. Eng damit verbunden sind die Aktivitäten zur Implementierung von SAF, also aller Flugkraftstoffe, die ohne die Verwendung von fossilen Energiequellen hergestellt werden. Hinzu kommen Aktivitäten im Bereich nachhaltiges Flugzeugdesign, welche in der Regel eng verknüpft sind mit innovativen Antriebssystemen und Kraftstoffen. Aber auch die Anreizstrukturen zur Emissionsreduzierung, also Fragen der Regulierung, sowie die Messung der externen Effekte des Fliegens haben einen hohen Stellenwert. Bei allen Teilthemen ist seit 2020 ein deutlicher Anstieg der Aktivitäten zu verzeichnen. Dies zeigt, dass global die Bedeutung deutlich zunimmt, Technologien für ein klimaverträglicheres Fliegen zu entwickeln.

Neben diesen direkten Technologieschwerpunkten kommen weitere indirekt relevante Schwerpunkte hinzu, welche in Abbildung 7 dargestellt sind. Hier wurden insgesamt fast 9.000 Dokumente identifiziert, die ebenfalls einen Einfluss auf die Entwicklungen in den Bereichen Kraftstoffe und Antriebskonzepte haben, allerdings eher indirekt. Dazu zählen vor allem Aktivitäten, die sich mit den Rahmenbedingungen des Flugverkehrs auseinandersetzen, also beispielsweise den Implikationen auf die Energieinfrastruktur oder den Folgen des CO₂-Ausstoßes. Hinzu kommen regulatorische Fragen, die auf das Umfeld einwirken und damit einen Impact auf die



Abb. 7 Indirekte Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens (weltweit)



Zeitraum: 2017–2023; n=8.965 Dokumente

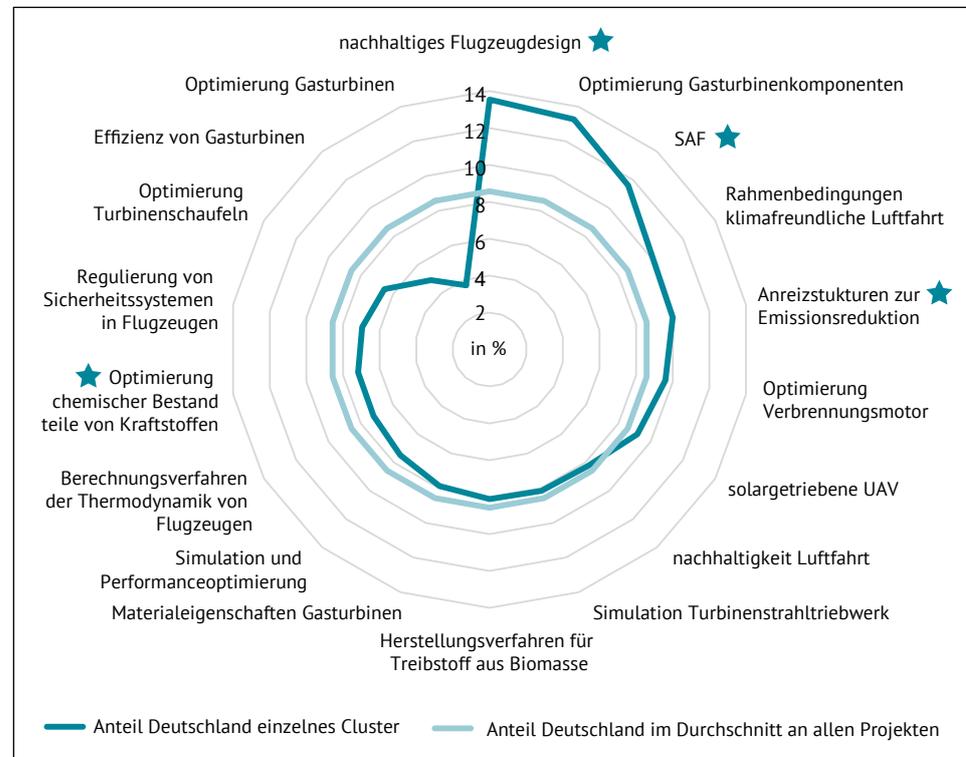
Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

technologischen Entwicklungen in den Bereichen Kraftstoffe und Antriebe haben. Auch angrenzende Technologiefelder haben eine Bedeutung, beispielsweise solar-getriebene unbemannte Flugsysteme, die Simulation von Turbinenstrahltriebwerken oder die Herstellungsverfahren für Treibstoff aus Biomasse.

Vergleicht man die Aktivitäten der deutschen Akteure an der Gesamtzahl der Publikationen, zeigt sich, dass vor allem bei den Themenschwerpunkten Optimierung von Gasturbinenkomponenten, Herstellung von SAF, Rahmenbedingungen für eine klimafreundliche Luftfahrt, Anreizstrukturen zur Emissionsreduktion, Optimierung vom Verbrennungsmotor und Solargetriebene unbemannte Fluggeräte (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) eine relativ hohe Beteiligung festzustellen ist (Abb. 8). Relativ gering hingegen ist der Anteil der Aktivitäten deutscher Akteure bei den Themen rund um



Abb. 8 Relation der deutschen Beteiligung an den Aktivitäten im Vergleich zur Gesamtmenge



Zeitraum: 2017–2023; n=1.006 Beteiligungen deutscher Akteure und 11.739 Dokumente aller Akteure in den ausgewählten Themenschwerpunkten. Die mit Sternchen markierten Cluster sind diejenigen mit einem direkten technologischen Bezug zu den Bereichen Kraftstoffe und Antriebe.

Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank

die Optimierung der Gasturbine oder auch die Optimierung chemischer Bestandteile von Kraftstoffen, zu der dennoch absolut gesehen auch in Deutschland (wie weltweit) die meisten Publikationen erscheinen.

5.1.2 Europäische Innovationsförderung

Eine weitere relevante Quelle zur Identifikation der aktuellen technologischen Entwicklungen sind die Projekte, die im Rahmen der europäischen Innovationsförderung durchgeführt wurden und die in der Datenbank CORDIS²⁶ erfasst sind. In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl an Projekten finanziert, die sich ganz konkret mit Technologien für klimaverträglicheres Fliegen beschäftigen. Um diese Projekte zu identifizieren, wurde wiederum auf den Einsatz von KI-basierten Methoden zurückgegriffen, bei der ein neuronales Netz angelernt wurde, um die relevanten Projekte

²⁶ <https://cordis.europa.eu/de> (3.4.2024)

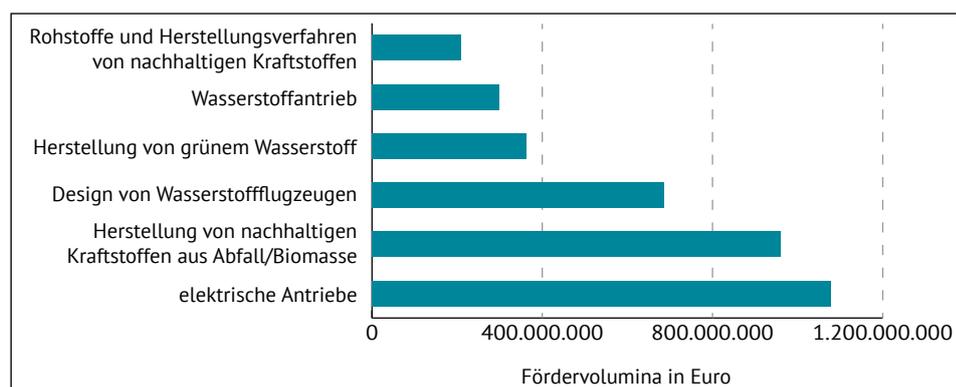


aus der Vielzahl der Gesamtprojekte herauszufiltern.²⁷ Die Ergebnisse dieser Analyse wurden dann durch Expert/innen geprüft und validiert. Im Ergebnis konnten jene Projekte herausgefiltert werden, die eine besonders hohe Relevanz für das Thema haben.

Insgesamt wurden auf diese Weise mehr als 2.000 relevante Projekte identifiziert, die einen Bezug zum klimaverträglicheren Fliegen haben (Zeitraum: 1/2017 bis 3/2023). Diese Projekte haben zum Teil einen sehr engen und direkten Bezug zu den beiden Bereichen Kraftstoffe und Antriebskonzepte für einen klimafreundlicheren Luftverkehr, teilweise auch einen eher indirekten Bezug.

In Abbildung 9 sind die direkten Themenschwerpunkte entsprechend ihrer Bedeutung (geförderte Projektvolumina in Euro) dargestellt. Von den insgesamt rund 2.000 Projekten mit Relevanz haben mehr als 900 Projekte einen ganz direkten Bezug zu den inhaltlichen Schwerpunkten dieser Studie. Dabei ist zu erkennen, dass vor allem im Bereich elektrische Antriebe Projekte gefördert werden. Aber auch Antriebskonzepte für wasserstoffbetriebene Flugzeuge spielen eine wichtige Rolle. Bei den Kraftstoffen wurden vor allem Projekte zur Herstellung von nachhaltigen Kraftstoffen aus Abfall oder Biomasse, zur Herstellung von grünem Wasserstoff und zu weiteren Rohstoffen und Herstellungsverfahren für nachhaltige Kraftstoffe umgesetzt. Sowohl der Antrieb als auch die Nutzung von Kraftstoff tangieren die Projekte im Bereich Design von Wasserstoffflugzeugen. Von deutschen Akteuren wurden dabei 119 der insgesamt 928 Projekte umgesetzt. Damit rangieren die deutschen Akteure hinter dem Vereinigten Königreich (144), vor Spanien (115), Frankreich (98) und Italien (93).

Abb. 9 Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten



Zeitraum: 1/2017–3/2023; n=928 Projekte

Eigene Darstellung auf Basis von CORDIS

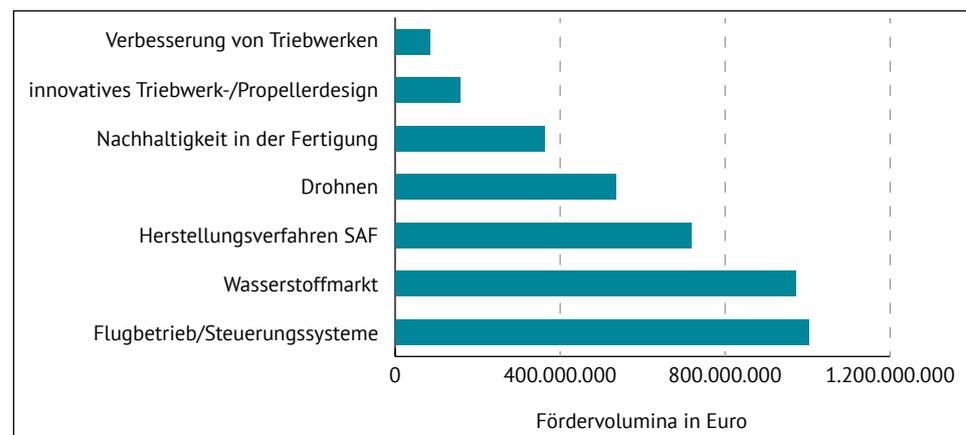
27 Dabei wurden folgende relevante Themenschwerpunkte definiert:

- aviation, aircraft, passenger travel, air travel, air traffic, flight, commercial aircraft fleet
- fuels, sustainable aviation fuel, SAF, biofuel, hydrogen, VFA, Fischer-Tropsch, FT-synthetis
- engine, propulsion, advanced low-emission, immitent technology, low-emission, aircraft propulsion, combustor
- sustainable, pollution, emission, decarbonisation, carbon dioxide, carbon, greenhouse gas



Hinzu kommen weitere Themencluster, die einen indirekten Bezug für den Themenschwerpunkt dieser Studie haben. Diese sind in Abbildung 10 dargestellt. Dazu zählen insbesondere Projekte, in denen sich mit dem Flugbetrieb und den entsprechenden Steuersystemen oder dem Markt und der Infrastruktur für Wasserstoff auseinandergesetzt wird. Aber auch die Herstellungsverfahren für SAF und die Entwicklung von Drohnensystemen mit elektrischen Antrieben unterstützen indirekt die technologischen Entwicklungen in den Bereichen Kraftstoffe und Antriebe in der Luftfahrt.

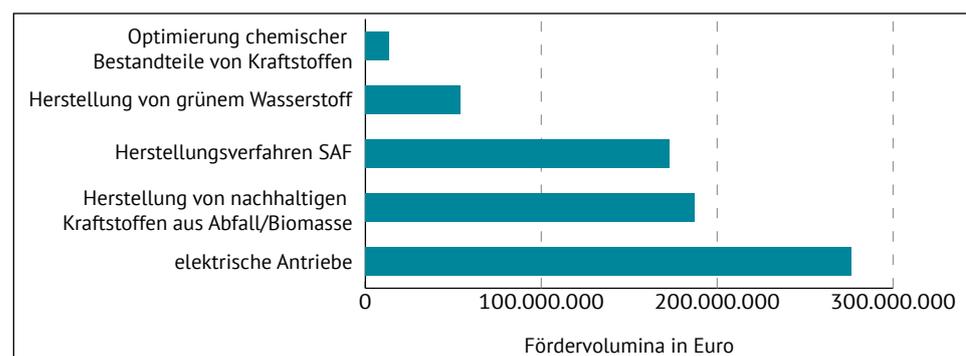
Abb. 10 Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten



Zeitraum: 1/2017–3/2023; n=1.086 Projekte

Eigene Darstellung auf Basis von CORDIS

Abb. 11 Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten deutscher Akteure



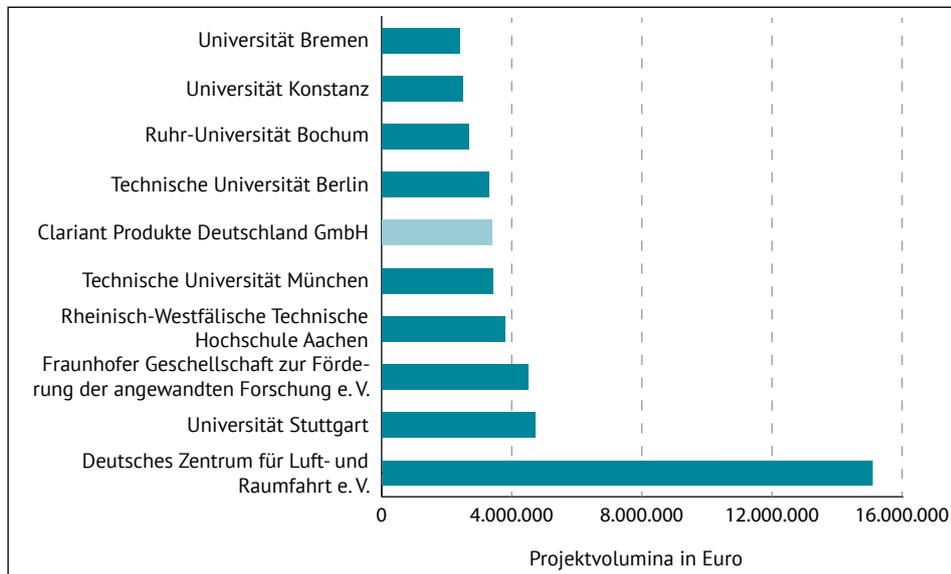
Zeitraum: 1/2017–3/2023; n=84 Projekte

Eigene Darstellung auf Basis von CORDIS

Innerhalb dieser Themencluster wurden in einem zweiten Schritt die Schwerpunkte der deutschen Akteure analysiert. Ziel war es dabei, die aktuellen Entwicklungen der deutschen Akteure zu identifizieren und zu prüfen, wo es Unterschiede und Spezifika im Vergleich zu den übrigen Akteuren und Projekten gibt. In Abbildung 11 zeigt sich, dass auch in den Projekten mit deutscher Beteiligung vor allem das Thema elektri-



Abb. 12 Top-10-Akteure in Deutschland



Eigene Darstellung auf Basis von CORDIS

sche Antriebe dominiert. Hinzukommen – ganz ähnlich wie bei der Gesamtmenge der Projekte – Schwerpunkte bei der Herstellung von nachhaltigen Kraftstoffen aus Abfall und Biomasse, die Herstellung von grünem Wasserstoff sowie die Optimierung der chemischen Bestandteile von Kraftstoffen.

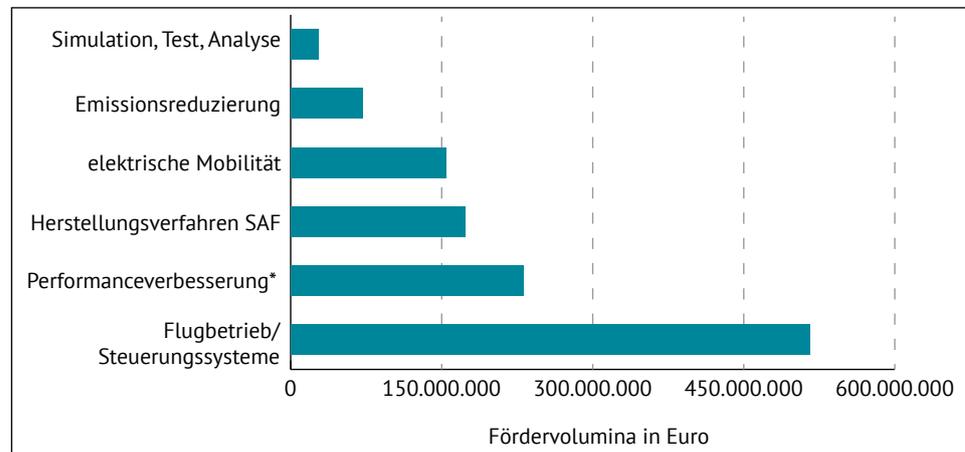
Im Folgenden sind zudem die wichtigsten deutschen Akteure dargestellt, die die Projekte dieser vier Themenschwerpunkte realisieren (Abb. 12). Sortiert in Bezug auf die erhaltenen Fördermittel durch die Europäische Kommission, zeigt sich, dass vor allem Hochschulen in Stuttgart, Aachen und München und Forschungsinstitutionen, u.a. das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung die Projekte umsetzen. Mit der Clariant Produkte GmbH ist nur ein Unternehmen unter den Top-10-Akteuren aus Deutschland vertreten.

Hinzu kommen weitere Themenschwerpunkte mit Beteiligung deutscher Akteure, die einen indirekten Bezug zum Fokus dieser Studie haben (Abb. 13). Auch hier zeigen sich ähnliche Strukturen wie bei der Gesamtmenge der Projekte. In Projekte zum Flugbetrieb und den entsprechenden Steuerungssystemen fließen die meisten Projektgelder. Doch auch die Performanceverbesserung durch Konstruktion und Materialforschung sowie die Herstellungsverfahren für SAF spielen eine wichtige Rolle.

Die Akteurslandschaft innerhalb dieser Themen zeigt sich ähnlich strukturiert wie in den Clustern mit sehr direktem Themenbezug. Auch hier dominieren die Forschungsinstitutionen (wiederum vor allem das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Fraunhofer Gesellschaft) sowie die Hochschulen (vor allem in München und Aachen).



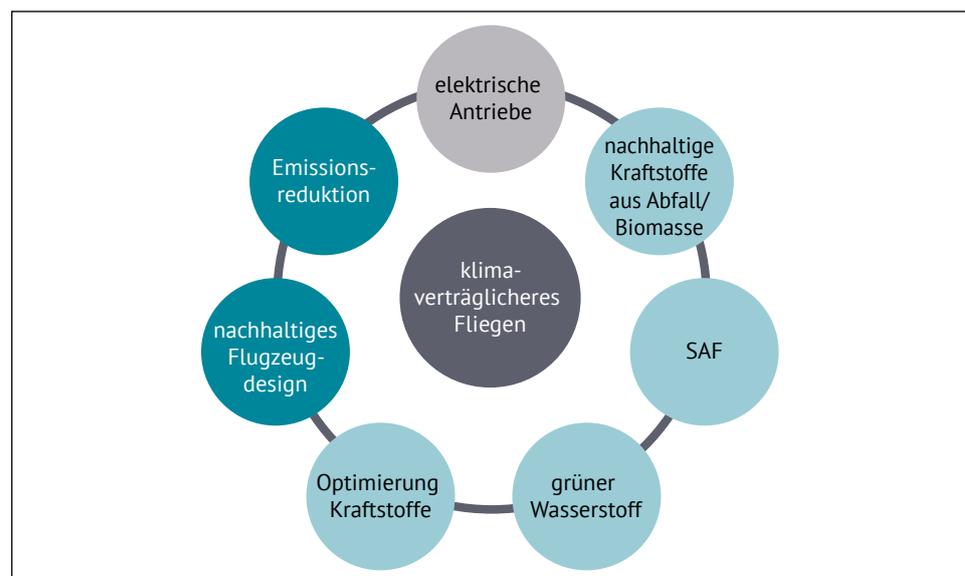
Abb. 13 Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten mit deutscher Beteiligung



* durch Propeller-/Flügelkonstruktion, Materialforschung, Brennstoffzellen
Zeitraum: 1/2017–3/2023; n=169 Projekte
Eigene Darstellung auf Basis von CORDIS

Die Analyse aktueller wissenschaftlicher Publikationen und europaweit geförderter Forschungsprojekte zeigt die Technologieschwerpunkte für die beiden Bereiche Kraftstoffe und Antriebskonzepte für einen klimafreundlicheren Luftverkehr. Diese sind zusammenfassend in Abbildung 14 dargestellt.

Abb. 14 Synthese – Technologieschwerpunkte für die beiden Bereiche Kraftstoffe und Antriebskonzepte für einen klimafreundlicheren Luftverkehr



Eigene Darstellung



5.2 Innovative Kraftstoffe

SAF sind nicht auf Erdöl basierende Kraftstoffe, die als Kerosinalternativen entwickelt werden, um die CO₂-Emissionen aus dem Flugverkehr zu reduzieren und die wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit zu stärken (Barke et al. 2022). SAF können aus vielen Ressourcen gewonnen werden, deren chemische Bestandteile in die reinen Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden können (Del Monte et al. 2022; Kramer et al. 2022; Miller et al. 2022).

Derzeit wird vor allem in der EU zwischen zwei Arten von SAF unterschieden: Biokraftstoffe (erneuerbare Kraftstoffe; Kap. 5.2.1) aus biogenen Quellen und E-Fuels (synthetische Kraftstoffe; Kap. 5.2.2), die mittels PtL-Technologie direkt aus Kohlendioxid und Wasserstoff hergestellt werden (Cabrera/de Sousa 2022)

Als Drop-in-Kraftstoffe können SAF mit bestehenden Kraftstoffen gemischt werden oder diese ersetzen, wobei keine oder nur kleine Änderungen an den Flugzeug- oder Motorkraftstoffsystemen, der Verteilungsinfrastruktur oder den Lagereinrichtungen erforderlich werden (CAAFI o.J.). Drop-in-Kraftstoffe haben somit den Vorteil, dass sie nicht nur in neuen Flugzeuggenerationen die Emissionen senken können, sondern auch in bestehenden Flotten (Öko-Institut 2020b). Dies ist von besonderer Bedeutung, da Flugzeuge eine Lebensdauer von bis zu 30 Jahren besitzen (Öko-Institut 2020b). Darüber hinaus ist der Einsatz von Drop-in-Kraftstoffen insbesondere auf Langstreckenflügen interessant, da hier die klimafreundlicheren Optionen wie Elektro- und Wasserstoffantrieb aufgrund von technischen Herausforderungen aktuell noch ungeeignet sind (Eurocontrol 2023; Öko-Institut 2020b). Seitdem SAF als Emissionsminderungsmaßnahme für den internationalen Luftverkehr anerkannt wurden, sind erhebliche Fortschritte bei der Herstellung, Zertifizierung und kommerziellen Nutzung erzielt worden (Afonso et al. 2023).

Bevor für Flugzeuge alternative Kraftstoffe verwendet werden können, müssen diese Kraftstoffe strenge Kriterien erfüllen, die in den Spezifikationen für Flugkraftstoffe festgelegt sind, und zwar in Bezug auf die physikalischen Eigenschaften und auf die Gebrauchstauglichkeit (Afonso et al. 2023). Die Spezifikationen sind in der ASTM-Norm D7566 festgelegt (CAAFI o.J.). Die ASTM International (o.J.) hat gemeinsam mit der Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative die Norm D7566-21 „Specification for Aviation Turbine Fuels Containing Synthesized Hydrocarbons“ entwickelt, welche Spezifikationen als Mindestanforderungen für konventionelle sowie nachhaltige Kraftstoffe definiert, die konventionellen Kraftstoffen beigegeben werden. Ferner gilt für alle kommerziell verwendeten Kraftstoffe die ASTM D1665 „Standard Specification for Aviation Turbine Fuels“ oder Defence Standard 91-91 (Shahriar/Khanal 2022). An SAF werden die gleichen Anforderungen gestellt wie an konventionelle Kraftstoffe, um sicherzustellen, dass Flugzeugantriebe nicht neu entwickelt werden müssen (IATA o.J.). Zu den größten Herausforderungen zählt

Biokraftstoffe und E-Fuels sind unterschiedliche Kraftstoffe, die für eine klimaneutrale Luftfahrt genutzt werden können.



dabei die Generierung der gleichen Energiedichte wie bei herkömmlichen Kraftstoffen (Bauen et al. 2020).

In der Luftfahrtbranche ist der Treibstoffverbrauch allein für 77 bis 91 % der THG-Emissionen verantwortlich und seine Verarbeitung macht 8 bis 12 % der THG-Emissionen aus (Chester/Horvath 2009; Pinheiro Melo et al. 2020). Die Umstellung von fossilen Kerosinkraftstoffen auf neuartige Drop-in-Kraftstoffe spielt daher eine entscheidende Rolle bei künftigen Dekarbonisierungsstrategien im Luftfahrtsektor. Im Folgenden wird betrachtet, welche THG-Einsparpotenziale durch den Umstieg auf Biokraftstoffe, E-Fuels und Wasserstoff theoretisch realisiert werden können und welche technisch-ökonomischen, aber auch ökologischen Herausforderungen für die beschriebenen Lösungen bestehen.

5.2.1 Biokraftstoffe

SAF können aus verschiedenen Ausgangsstoffen durch unterschiedliche Verfahren hergestellt werden. Zu den Ausgangsstoffen zählen u.a. Speiseöl, Pflanzenöle, feste Siedlungsabfälle (Müll), Holzabfälle, Abgase, Zucker sowie landwirtschaftliche Rückstände (CAAFI o.J.). 2021 waren sieben Umwandlungsverfahren für die SAF-Produktion zugelassen (ASTM International o.J.), die unterschiedliche Technologiereifegrade aufweisen (Shahriar/Khanal 2022). Nachhaltiger Flugkraftstoff auf der Basis von wasserstoffbehandelten Estern und Fettsäuren (HEFA) ist heute eines der am häufigsten verwendeten und kommerziell erhältlichen Produkte (Airbus o.J.). Zu den aktuell nach D7566 anerkannten nachhaltigen Kraftstoffen zählen die folgenden Technologiepfade, die auf unterschiedlichen Rohstoffen basieren können (Tab. 3).

Die Bedeutung von Biokraftstoffen für eine klimaneutrale Luftfahrt

Ein besonderer Vorteil von Biokraftstoffen besteht darin, dass es keine Einschränkung der Reichweite gibt, was sie insbesondere für Langstreckenflüge interessant macht. Darüber hinaus bieten innovative Kraftstoffe, die aus erneuerbaren Energien hergestellt werden, der Luftfahrtindustrie die Möglichkeit, ihre Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. Das trägt zur Energieversorgungssicherheit bei und mindert das Risiko von Preisschwankungen sowie Versorgungsunterbrechungen von fossilen Brennstoffen.

Trotz dieser Vorteile entspricht die weltweite SAF-Produktion bislang nur 0,03 % des Treibstoffverbrauchs (basierend auf Zahlen vor der Pandemie). 2021 wurden weniger als 1 % der durchgeführten Flüge mit SAF betrieben (Airbus o.J.). Der Anteil alternativer Biokraftstoffe im Luftverkehr in der EU liegt aktuell nur bei 0,05 % aller verwendeten Treibstoffe (Öko-Institut 2020b) und die EU-Kommission nimmt an, dass sich dieser Anteil bis 2050 lediglich auf maximal 2,8 % erhöhen wird, wenn keine weiteren Fördermaßnahmen für nachhaltige Kraftstoffe ergriffen werden (EK o.J.).



Tab. 3 Nachhaltige Flugzeugkraftstoffe, ihre jeweiligen Ausgangsrohstoffe und Beimischungsverhältnisse

Technologie	Rohstoffe	Beimischung max. in % v/v	Technologie-reifegrad
anerkannt nach D7566-21			
Fischer-Tropsch-Synthese und Fischer-Tropsch-Paraffin-Kerosin mit Aromen	Feststoffabfälle, Kohle, natürliches Gas, Biomasse	50	7
wasserstoffbehandelte Ester und Fettsäuretechnologien (HEFA-SPK)	Pflanzenöle wie Palmöl, Leinöl, Purgiernuss, benutzte Kochöle; Tierfette	50	9
HH-SPK und HC-HEFA	Öle aus der Botryococcus-braunii-Alge	10	6
Synthesized Iso-Paraffin (HSF-SIP)	Zuckerrohr, Zuckerrübe, Getreidestärke	10	5-7
Alcohol-to-Jet-Technologien (Isobutanol/Ethanol)	Zuckerrohr, Zuckerrübe, Sägemehl, Lignozellulose, Getreidestärke	50	7
katalytische Hydrothermolyse	Abfallöle, Energieöle	50	6-7
anerkannt nach D1655			
Fette, Öle und Schmiermittel Co-Processing	Fette, Öle, und Schmiermittel	5	
Fischer-Tropsch Co-Processing	karbonbasierte Biomasse	5	
weitere in Entwicklung			
Elektrotreibstoff (PtL)	Wasser, Luft (Erdöl)	100	
CO ₂ to SAF	CO ₂	100	

Quelle: Afonso et al. 2023; Bauen et al. 2020; IATA o.J.; Shahriar/Khanal 2022

Langfristig müssten ca. 449 Mrd. SAF produziert werden, um das Ziel einer klimaneutralen Luftfahrt bis 2050 zu erreichen. Dies erfordert geeignete Anreize und langfristige politische Maßnahmen, die die Verwendung von SAF fördern (Airbus o.J.).

Zudem ist zu berücksichtigen, dass Biokraftstoffe nur eine nachhaltige Alternative zu fossilen Kraftstoffen darstellen, wenn ihre Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen über den gesamten Lebenszyklus hinweg geringer sind als bei herkömmlichem Flugkraftstoff (Afonso et al. 2023). Dabei muss die Ökobilanz die gesamte Produktionskette umfassen – vom Anbau des Rohstoffes, dem Transport, der Vorbehandlung bis zu den Umwandlungsprozessen (Afonso et al. 2023). Die Biokraftstoffe weisen tendenziell eine niedrigere Treibhausgasbilanz auf als herkömmliche Flugkraftstoffe.

Als Herausforderung für die flächendeckende Implementierung gelten die deutlich höheren Kosten von Biokraftstoffen im Vergleich zu konventionellem Kerosin. Die Schätzungen reichen vom 2-Fachen für einige abfallbasierte Quellen bis zum 6- bis 10-Fachen für synthetische Kraftstoffe mit Kohlenstoffabscheidung (Aviationsbenefits o.J.). Dies ist hauptsächlich auf die geringen Produktionsmengen zurückzuführen.



Um wettbewerbsfähig zu sein, müssen die Produktionskosten gesenkt werden, was eine Produktionsskalierung und technologische Innovationen erfordert. Zudem sind aktuell nicht genügend erneuerbare Energien für die Produktion von Biokraftstoffen verfügbar, um die Herstellung tatsächlich klimaneutral zu gestalten.

Die Bereitstellung einer Infrastruktur für Produktion, Transport, Lagerung und Verteilung von innovativen Kraftstoffen ist eine komplexe Aufgabe. Sie erfordert Investitionen in neue Anlagen und Logistiknetze, um sicherzustellen, dass die Kraftstoffe auf Flughäfen weltweit verfügbar sind. Die Zulassung und Zertifizierung innovativer Kraftstoffe macht strenge Tests und Sicherheitsbewertungen nötig. Die Industrie und die Regulierungsbehörden müssen sich auf Standards und Verfahren einigen, um sicherzustellen, dass die neuen Kraftstoffe sicher in Flugzeugen verwendet werden können. Die Herstellung von klimaneutralen Kraftstoffen erfordert Kohlendioxid, das aus erneuerbaren Quellen oder direkt aus der Atmosphäre abgefangen wurde. Die Verfügbarkeit dieser CO₂-Quellen kann begrenzt sein und muss gemanagt werden.

Für die Einführung innovativer Kraftstoffe ist zudem die Akzeptanz von Fluggesellschaften, Flughäfen und der Luftfahrtindustrie als Ganzes essenziell. Außerdem erfordert der Übergang Investitionen in neue Technologien und Schulungen für das Personal. Die Schaffung geeigneter politischer und regulatorischer Rahmenbedingungen ist daher entscheidend für die Förderung innovativer Kraftstoffe. Dies kann die Einführung von Anreizen, Subventionen oder Emissionshandelssystemen umfassen, um die Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe zu fördern. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass potenzielle Konflikte mit der Ernährungssicherheit, der Landnutzung und anderen Ökosystemleistungen bestehen (Calvin et al. 2021). Insbesondere Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse sind vor diesem Hintergrund problematisch (Bopst et al. 2019a).

5.2.2 E-Fuels

E-Fuels ähneln in ihrer chemischen Zusammensetzung fossilen Kraftstoffen wie Kerosin. Sie werden durch Elektrolyse von Wasser in Wasserstoff und die anschließende Umwandlung von Wasserstoff mit CO₂ in synthetische Kraftstoffe hergestellt. Die benötigte Elektrizität für die Elektrolyse sollte dabei aus erneuerbaren Energiequellen stammen, um die Umweltauswirkungen zu minimieren. Die für diesen Prozess benötigte Kohlenstoffquelle sollte ebenfalls einen nicht fossilen Ursprung haben, damit der synthetisierte Kraftstoff einen Klimavorteil bringt. Als nachhaltige Quellen bieten sich beispielsweise biogene Abgasströme aus der Bioethanol- und Biogasherstellung an. Diese Abgasströme haben einen sehr hohen CO₂-Anteil, sodass die Abscheidung verhältnismäßig wenig Strom verbraucht (Öko-Institut 2020b). Allerdings sind die Mengenpotenziale beschränkt und die Biogasanlagen weit über das Land verteilt, womit sich dieses Vorgehen tendenziell nicht so gut für die großindustrielle E-Fuel-Produktion eignet (Öko-Institut 2020b). Die Abtrennung von CO₂ aus der Luft (Carbon Capture) stellt in diesem Zusammenhang eine weitere Möglichkeit dar (WEF



2022, S.11 f.); allerdings ist der Energieverbrauch aufgrund der geringen CO₂-Konzentration in der Luft (0,04 %) mit 0,7 bis 1,8 Megajoule (Strom) und 5,4 bis 9,0 Megajoule (Wärme) pro kg CO₂ deutlich höher (Öko-Institut 2020b). Eine Skalierung von PtL-Verfahren zur Erzeugung von E-Fuels ist davon abhängig, dass der Ausbau erneuerbarer Energiequellen voranschreitet, die Produktionsprozesse räumlich nah beieinander sind, um Transportwege zu vermeiden, und Produktionsprozesse derart gestaltet werden, dass auch Nebenprodukte kostengünstig genutzt werden können (WEF 2022, S.14).

Die Bedeutung von E-Fuels für eine klimaneutrale Luftfahrt

Im Gegensatz zum Mengenpotenzial nachhaltiger Biokraftstoffe für den Luftverkehr, das als eingeschränkt gilt, wird das Mengenpotenzial von PtL-Kraftstoffen langfristig als ausreichend beurteilt (Öko-Institut 2020b). Entscheidend dafür, ob E-Fuels nachhaltiger sind als konventionelles Kerosin, ist die Stromherkunft. Stammt der Strom aus fossilen Brennstoffen, kann die Herstellung von E-Fuels sogar mehr Emissionen verursachen (Öko-Institut 2020b). Ein Nachteil synthetischer Kraftstoffe liegt im begrenztem Treibhausgasreduzierungs potenzial. Zwar lassen sich (fossile) CO₂-Emissionen vermeiden, andere Luftschadstoffe werden jedoch weiterhin bei der Verbrennung ausgeschieden (Öko-Institut 2020b). Insgesamt wird geschätzt, dass sich die Klimawirkung durch den Einsatz von E-Fuels nur um etwa 30 bis 60% verringern lässt (Clean Sky 2/FCH 2 2020).

Sowohl für die Deckung des Strombedarfs von E-Fuels als auch von Elektroflugzeugen wäre ein massiver, zusätzlicher Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig, um diesen nachhaltig decken zu können (Öko-Institut 2020b). 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 wird erneuerbarer Strom auch für viele andere Zwecke, wie z.B. Licht, Wärme oder Mobilität, benötigt (Öko-Institut 2020b)

Um eine Elektrifizierung einer klimaneutralen Luftfahrt mit E-Fuels und Elektroflugzeugen voranzutreiben, ist ein enormer Ausbau der erneuerbaren Energien erforderlich.

Carbon Capture to Sustainable Aviation Fuel (CCSAF; oder auch Direct Air Carbon Capture and Storage – DACCS) ist ein innovativer Ansatz, der darauf abzielt, die CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre zu erfassen (Öko-Institut 2020b) und sie in nachhaltige Flugzeugkraftstoffe umzuwandeln. Dieser Prozess kombiniert Technologien zur Kohlendioxidabscheidung (Carbon Capture) mit der Produktion von SAF, um einen kohlenstoffneutralen oder sogar kohlenstoffnegativen Treibstoff für Flugzeuge herzustellen (Brownlow 2023). Diese Technologie bietet potenziell viele Vorteile, darunter Emissionsreduktion, CO₂-Recycling und nahtlose Integration in die bestehende Luftfahrtindustrie. Allerdings gibt es Herausforderungen, darunter die unzureichende Effizienz des CO₂-Abscheidungsprozesses, die Kosten und die Verfügbarkeit von erneuerbarem Wasserstoff oder anderen Kohlenstoffquellen (Interview Donus; Lausberg 2022).



5.2.3 Wasserstoff

Darüber hinaus wird derzeit Wasserstoff sowohl in gasförmiger als auch in kryogener Form als alternative Option für den Einsatz in kommerziellen Flügen erforscht (Afonso et al. 2023; Clean Sky 2/FCH 2 2020). Da dieser Wasserstoff durch Wasserspaltung erzeugt wird, hängen die meisten der damit verbundenen Umweltauswirkungen mit der Art der verwendeten Elektrizität zusammen.

Die Bedeutung von Wasserstoff als Brennstoff für eine klimaneutrale Luftfahrt

Bereits in den 1980er Jahren wurde Wasserstoff im Luftverkehr erprobt. Seit dem Jahrtausendwechsel werden mehrere Brennstoffzellenkleinflugzeuge als Prototypen entwickelt und analysiert. Airbus hat angekündigt, bis 2035 ein Wasserstoffflugzeug auf den Markt zu bringen, das mittlere Strecken von bis zu 4.000 km zurücklegen kann (Öko-Institut 2020b). Bei der Wasserstofftechnologie spielen Technik, Temperatur und die verwendeten Tanks eine entscheidende Rolle. Wird Wasserstoff in flüssiger Form genutzt, hat er eine höhere Energiedichte. Hierfür wird er bei -253 °C in isolierten Tanks gespeichert (Öko-Institut 2020b). Trotz dieser Isolierung kann es jedoch zum Verdampfen von H_2 und den entsprechenden Energieverlusten kommen. Deshalb sind besondere Sicherheitssysteme notwendig. Darüber hinaus wird bei der Wasserstoffspeicherung deutlich mehr Raum im Flugzeug benötigt, da verflüssigter Wasserstoff eine auf das Volumen bezogenen Dreiviertel geringere Energiedichte als Kerosin hat (Öko-Institut 2020b). Zudem haben die Tanks ein hohes Gewicht; Bei heutigen Prototypen macht der Wasserstoff nur einen Anteil von 20 % am Gesamtgewicht des gefüllten Tanks aus (Öko-Institut 2020b).

Diese Aspekte verdeutlichen, dass der Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt aus heutiger Sicht eine technisch aufwendige Lösung ist, die voraussichtlich nicht vor 2035 in relevanten Anwendungen eingesetzt werden dürfte (Öko-Institut 2020b). Alle diese technischen Herausforderungen erscheinen jedoch lohnenswert, wenn man das Emissionssenkungspotenzial der Wasserstofftechnologie in den Blick nimmt. Schätzungen gehen davon aus, dass unter Berücksichtigung der Nicht- CO_2 -Effekte die Klimawirkung um 50 bis 75 % reduziert werden können, wenn Wasserstoff als Brennstoff verwendet wird (Öko-Institut 2020b). Im Falle der Nutzung in Brennstoffzellen wird sogar eine Minderung um 75 bis 90 % erwartet (Öko-Institut 2020b).

Zwischenfazit zu innovativen Kraftstoffen

Theoretisch ist es möglich, den Kraftstoffbedarf für die Luftfahrt zu 100 % aus nachhaltigen Biokraftstoffen zu decken, die aus energiereichen Pflanzen, landwirtschaftlichen Reststoffen oder Abfällen hergestellt werden (Öko-Institut 2020b). Dennoch ist ungewiss, ob ein flächendeckender Einsatz künftig realisiert werden kann. Dazu



bedarf es einer Skalierung der jeweiligen Produktionsprozesse auf industrielles Niveau (Interviews Cames, Donus u. Kasten). Es wären immense Wassermengen und große Flächen notwendig, um Pflanzen in der notwendigen Größenordnung anzubauen (Öko-Institut 2020b). Zudem wären extrem hohe Investitionen nötig, um die Infrastruktur zur Erzeugung dieser Kraftstoffe aufzubauen (Öko-Institut 2020b). Es müssten die politischen Rahmenbedingungen wie beispielsweise die CO₂-Bepreisung dazu beitragen, dass die notwendigen Kraftstoffmengen produziert werden können (Öko-Institut 2020b).

Mit der heutigen Antriebstechnik müssen flüssige Kohlenwasserstoffe als Treibstoffe eingesetzt werden, denn nur sie haben eine ausreichende Energiedichte (Bopst et al. 2019a). Aufgrund der engen globalen Vernetzung des Luftverkehrs muss eine einheitliche Energieversorgung auf allen Flughäfen gewährleistet sein, da parallele Infrastrukturen zusätzliche Kosten verursachen würden (Bopst et al. 2019a). Auch aus diesem Grund ist ein Wechsel auf eine grundsätzlich andere Energieversorgung mittelfristig nicht zu erwarten (Bopst et al. 2019a).

5.3 Innovative Antriebskonzepte

Neben den Bestrebungen, klimafreundlichere Kraftstoffe zu entwickeln, gewinnen auch die Anstrengungen zur Entwicklung innovativer Antriebskonzepte weiter an Dynamik. Immer mehr Prototypen und Demonstrationsprojekte werden entwickelt und erprobt, um die Praktikabilität, Effizienz und Sicherheit dieser Technologien zu demonstrieren.

Elektromotor

Bei elektrischen (Propeller-)Triebwerken werden Elektromotoren verwendet, die von Batterien angetrieben werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Düsenantrieben erzeugen sie keine direkten Emissionen. Elektroflugzeuge können in turboelektrische, hybridelektrische (HEP) und vollelektrische Flugzeuge unterteilt werden (Adu-Gyamfi/Good 2022). Das angestrebte Paradigma für die Luftfahrt ist die Ermöglichung vollelektrischer Flüge in allen Segmenten, wobei die damit verbundenen Herausforderungen zunehmen, je höher die gewünschte Nutzlast und Reichweite ist (Afonso et al. 2023).

Die Bedeutung von Elektromotoren für klimaneutrale Luftfahrt

Im Flugbetrieb könnte der batterieelektrische Antrieb die klimafreundlichste Option im Luftverkehr darstellen. Es entstehen keine CO₂-Emissionen und auch Nicht-CO₂-Effekte treten nicht auf – im Gegensatz zu alternativen Kraftstoffen und mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen (Öko-Institut 2020b). Der größte Nachteil batterieelektrischer Antriebe im Vergleich zu Kerosin besteht in der geringen



Energiedichte und dem damit einhergehenden hohen Gewicht der Lithium-Ionen-Batterien (Öko-Institut 2020b). Bisher wurden daher nur wenige Konzepte für die kommerzielle Luftfahrt vorgestellt, die meisten davon mit geringer Nutzlast und sehr begrenzter Reichweite (Afonso et al. 2023). Insbesondere für Langstreckenflüge kommen Elektromotoren derzeit nicht infrage, da die heute verfügbaren elektrischen Batterien das Flugzeug zu schwer machen würden, um abzuheben. Daher wird aktuell an Batterien mit deutlich höherer Energiedichte geforscht und es werden Hybridkonzepte in Betracht gezogen. Nach heutigem Stand ist davon auszugehen, dass weitere 20 bis 30 Jahre vergehen werden, bis Elektroantriebe in Verkehrsflugzeugen zum Standard werden könnten (Öko-Institut 2020b). Und auch in Zukunft wird sich ihr Einsatz wahrscheinlich auf kleinere Flugzeuge und Kurzstrecken beschränken, beispielsweise für den Flug auf Inseln (Öko-Institut 2020b).

Wasserstoffbrennstoffzelle

Wasserstoffbrennstoffzellen wandeln H_2 und O_2 in H_2O um, wobei gleichzeitig elektrische Energie erzeugt wird. Dieser Prozess ist elektrochemisch und erfolgt ohne Verbrennung, wodurch schädliche Emissionen wie CO_2 vermieden werden. Das einzige Nebenprodukt dieses Prozesses ist Wasserdampf. Die Wasserstoffbrennstoffzelle kann entweder als alleiniger Antrieb oder in Kombination mit anderen Antriebsquellen wie Elektromotoren eingesetzt werden.

Die Bedeutung von Wasserstoffbrennstoffzellen für klimaneutrale Luftfahrt

Wird der Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt, kann die Wasserstoffbrennstoffzelle eine weitgehend emissionsfreie Option darstellen. Es wird ein Emissionsminderungspotenzial von 75 bis 90 % angenommen (Öko-Institut 2020b). Weitere Vorteile liegen im geräuscharmen Betrieb sowie der hohen Energieeffizienz, da der eingespeiste Wasserstoff direkt in Elektrizität umgewandelt wird, ohne den Umweg über die Verbrennung von Kraftstoff zu gehen. Darüber hinaus besteht das Potenzial, in Zukunft auch Langstreckenflüge mit dieser Technologie betreiben zu können.

Eine Herausforderung bei der Implementierung dieser Technologie besteht in der Entwicklung leistungsfähiger Brennstoffzellen und Wasserstoffspeichertechnologien, der Gewährleistung von Sicherheit bei der Handhabung von Wasserstoff sowie der Bereitstellung einer ausreichenden Infrastruktur zur Wasserstoffversorgung an Flughäfen. Derzeit wird die Wasserstoffbrennstoffzellentechnologie hauptsächlich für kleinere Flugzeuge und unbemannte Luftfahrzeuge (Drohnen) entwickelt. Für größere Passagierflugzeuge sind weitere Fortschritte und Investitionen erforderlich, um die Technologie in großem Maßstab nutzbar zu machen.



Hybride Antriebskonzepte

Bei Hybridsystemen werden herkömmliche Düsentriebwerke mit Elektromotoren kombiniert. Das Flugzeug kann den Elektromotor für Start und Landung nutzen, was Lärm und Emissionen in der Nähe von Flughäfen reduziert, und für den Reiseflug auf Düsentriebwerke umschalten. Als nächster Schritt in der Verbesserung der Effizienz von Flugzeugen gilt die Integration von Teilsystemen, um positive Wechselwirkungen zwischen Teilkomponenten synergetisch nutzbar zu machen (Ranasinghe et al. 2019). Eine vorgeschlagene Methode ist der Einsatz eines verteilten Antriebs, bei dem die Schubkraft eines Flugzeugs mit mehreren kleineren Triebwerken erzeugt wird – im Gegensatz zur herkömmlichen Antriebskonfiguration mit großen Triebwerken, die konzentrierte Schubvektoren erzeugen. Dieses Konzept weist insbesondere große Synergien mit den aufkommenden Hybridelektrotechnologien auf, die eine Alternative zum ausschließlichen Einsatz von Verbrennungsmotoren darstellen. Beide Konzepte können kombiniert werden und bieten große Vorteile in Bezug auf Lärmreduzierung, höhere Zuverlässigkeit, kürzere Start- und Landestrecken, besseren spezifischen Kraftstoffverbrauch und verbesserte Flugstabilität (Ranasinghe et al. 2019). Es wird diskutiert, Hybridantriebssysteme zu nutzen, um die Lücke zwischen den Energiedichten von elektrochemischen Zellen und flüssigen chemischen Kraftstoffen, die in Verbrennungsmotoren verwendet werden, zu schließen (Ranasinghe et al. 2019).

Die Bedeutung von hybriden Antriebskonzepten für eine klimaneutrale Luftfahrt

Hybride Antriebskonzepte werden als Kompromisslösung angesehen, um einige der offenen Probleme von vollelektrischen Systemen zu überwinden. Sie könnten gewissermaßen eine Brücke zwischen herkömmlichen, fossilen Kraftstoffen und vollständig elektrisch oder mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen darstellen. Sie haben das Potenzial, Vorteile wie mögliche Kraftstoffeinsparungen, geringere Emissionen und weniger Lärm bei Start und Landung zu realisieren. Dennoch verfügen sie über einige Nachteile. Dazu gehört die Komplexität der Integration von zwei Antriebssystemen, der Gewicht- und Platzbedarf zusätzlicher Komponenten an Bord sowie die eingeschränkte Reichweite (Interview Donus).

Water-enhanced Turbofan-Triebwerke

Da Turbofan-Triebwerke (WET) die am weitesten verbreitete Antriebstechnologie in Verkehrsflugzeugen sind, haben Fortschritte in diesem Bereich ein sehr großes Potenzial, die Luftfahrt klimafreundlicher zu machen (Ranasinghe et al. 2019). So zielen WET darauf ab, die Effizienz der Turbofan-Triebwerken zu steigern und gleichzeitig die Emissionen zu reduzieren, indem Wasser als ein integrales Element in den Triebwerksbetrieb einbezogen werden. Hierbei wird Wasser flüssig oder als feiner Nebel in den Luftstrom des Triebwerks eingespritzt, normalerweise in der Brennstoffkammer oder am Kompressor. Das eingespritzte Wasser hilft bei der Kühlung der Ver-



brennungsgase in der Brennkammer, was höhere Verbrennungstemperaturen ermöglicht und somit die Effizienz des Triebwerks steigert. Die Technologie erfordert eine genaue Steuerung des Wasserflusses, um die gewünschten Effekte zu erzielen, ohne den Triebwerksbetrieb zu beeinträchtigen. Außerdem kann die zusätzliche Feuchtigkeit im Triebwerk Korrosion und andere technische Herausforderungen verursachen, die gelöst werden müssen.

Die Bedeutung des WET für eine klimaneutrale Luftfahrt

Neben der Effizienzsteigerung gegenüber konventionellen Antrieben verringert die Einspritzung des Wassers beim WET die Bildung von NO_x während der Verbrennung. NO_x sind schädliche Treibhausgase und Schadstoffe, die zur Luftverschmutzung beitragen. Zudem kann der Lärmpegel des Triebwerks durch die Wassereinspritzung reduziert werden. Es wird geschätzt, dass dieser Ansatz den spezifischen Kraftstoffverbrauch (SFC) um 15 % reduziert (Afonso et al. 2023).

Zwischenfazit zu innovativen Antriebskonzepten

Zu den Vorteilen der diskutierten Antriebstechnologien gehören die potenzielle Reduzierung von THG-Emissionen, die Diversifizierung der Energiequellen sowie die Lärmreduzierung. Daneben gibt es eine ganze Reihe von technologischen Herausforderungen und Barrieren bei der Implementierung. Die beschriebenen Antriebskonzepte, wie Elektroantriebe, Wasserstoffbrennstoffzellen und Hybridantriebe, befinden sich aktuell noch in der Entwicklungsphase. Flugzeuge sind aufgrund von Sicherheits- und Effizienzgründen sehr gewichtsempfindlich. Insbesondere die erforderlichen Energiespeichersysteme wie Batterien und Wasserstofftanks können zusätzliches Gewicht bedeuten, was die Flugleistung und Reichweite einschränkt. Entwicklung und Integration der beschriebenen Antriebskonzepte stellen einen erheblichen Kostenaufwand dar. Elektrische Antriebe sind stark von Fortschritten in der Batterietechnologie abhängig. Die Entwicklung von leistungsstarken, leichten und kosteneffizienten Batterien ist eine der größten Herausforderungen bei der Einführung elektrischer Antriebe in der Luftfahrt. Wenn Wasserstoff als Kraftstoff oder zur Stromerzeugung in Brennstoffzellen verwendet wird, ist eine umfangreiche Wasserstoffinfrastruktur nötig, um Produktion, Transport und Lagerung sicherzustellen, was beträchtliche Investitionen erfordert. Zudem müssen die Flugzeugwartung und -betriebsbereitschaft für innovative Antriebe angepasst werden. Dies erfordert Schulungen und Ressourcen, um sicherzustellen, dass die neuen Technologien effizient und sicher betrieben werden können.

5.4 Weitere Innovationsbereiche

Die Dekarbonisierung der Luftfahrt wird nicht allein mit Innovationen in den Bereichen Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte zu bewerkstelligen sein. Darüber hinaus spielt die Optimierung des Flug- und des Bodenbetriebs eine wesentliche Rolle

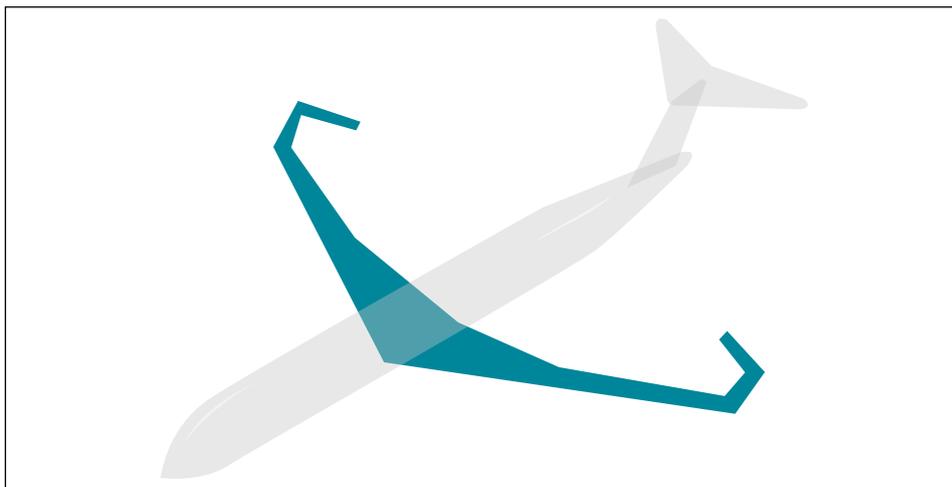


(Afonso et al. 2023). So könnten beispielsweise nicht nur die hohen Kraftstoffkosten von E-Fuels abgedeckt und die spezifischen CO₂-Emissionen pro Fluggast reduziert, sondern auch die Reichweite von Flugzeugen mit alternativen Antriebskonzepten erhöht werden (Öko-Institut 2020b).

Effizienterer Flugzeugbau

In den letzten Jahrzehnten wurden konventionelle Flugzeugdesigns immer weiter optimiert, sodass sie heute einen Stand erreicht haben, bei dem eine weitere Verbesserung nur sehr aufwendig zu bewerkstelligen und ein steiler Effizienzanstieg nicht mehr zu erwarten ist (Abbas et al. 2013). Dennoch wird an neuartigen Flugzeugkonfigurationen geforscht, die den Luftwiderstand erheblich verringern (Afonso et al. 2023). Durch die aerodynamische Verbesserung, wie beispielsweise durch besonders glatte Oberflächenbeschaffenheit oder die Verwendung gebogener Flügelspitzen (Winglets; Abb. 15), lässt sich der Kraftstoffverbrauch senken und die Reichweite erhöhen (Öko-Institut 2020b).

Abb. 15 Winglet-Design

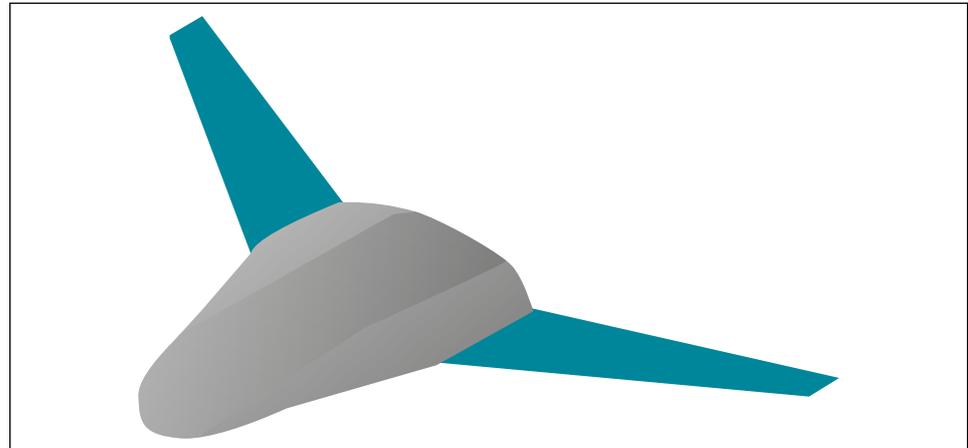


Quelle: nach Afonso et al. 2023

In Zukunft könnte insbesondere das Blended-Wing-Body-Design (BWB; Abb. 16) eine besonders interessante neuartige Flugzeugform darstellen (Öko-Institut 2020b). Darüber hinaus entwirft die National Aeronautics and Space Administration (NASA) im Rahmen der amerikanischen „Sustainable Flight National Partnership“ aktuell das Experimentalflugzeug X-66A mit besonders dünnen, kerosinsparenden Flügeln, die nach dem Transonic-Truss-Braced-Wing-Prinzip (TTBW) funktionieren (O’Shea 2023; Schwan 2023). Rolls-Royce hat die UltraFan-Technologie erfolgreich getestet, eine völlig neue Triebwerksarchitektur, die einen großen Schritt zur Effizienzverbesserung heutiger und künftiger Flugtriebwerke darstellt (DGLR 2023).



Abb. 16 Blended-Wing-Body-Design



Quelle: nach Afonso et al. 2023

Luftbetankung (Air-to-Air Refueling)

Als eine weitere Option zur Reduktion des Gesamtkraftstoffverbrauchs auf Langstreckenflügen wird derzeit auch die Luftbetankung geprüft (Wagner et al. 2002). Sie erfordert ein Tankflugzeug, das die Flugzeuge mit Treibstoff versorgt. Dies ist ein gefährlicher Vorgang, der eine sorgfältige Planung nötig macht, da beide Flugzeuge während der Betankung synchron fliegen müssen. Das Verfahren wird bereits bei militärischen Anwendungen eingesetzt, bei denen ein bestimmtes Flugzeug von einem bemannten Tankflugzeug mit Treibstoff versorgt wird. Thomas et al. (2014) schlagen unbemannte Luftfahrtsysteme vor, um die Aufgabe des Tankflugzeugs zu übernehmen. Airbus ist es beispielsweise 2020 gelungen, die erste vollautomatische Luftbetankung mit einem A330-Tankflugzeug durchzuführen (Airbus 2020).

Für die Luftbetankung geben Afonso et al. (2023) ein hohes Effizienzsteigerungspotenzial an. Die Technologiereife gilt als hoch. Diese Lösung ist vor allem für Langstreckenflüge interessant, da mehr als die Hälfte des Flugzeuggewichts auf den Treibstoff entfallen kann. Laut Nangia (2006) ließen sich damit bis zu 40% des Treibstoffs einsparen (Afonso et al. 2023). Die betriebliche Sicherheit ist allerdings eine Herausforderung für die Implementierung.

Zusätzliche Zwischenstopps zur Betankung

Eine Alternative zur Luftbetankung sind zusätzliche Zwischenstopps zur Betankung (Afonso et al. 2023). Dieser Ansatz wird bereits bei einigen zivilen und militärischen Frachttransporten verfolgt. Er hat ebenfalls den Vorteil, dass mit weniger Gewicht geflogen werden kann, jedoch ohne gefährliche Manöver in der Luft (Afonso et al. 2023).



Das Potenzial, die Energieeffizienz mit zusätzlichen Zwischenstopps zur Betankung zu steigern, wird als mittel eingestuft. Auch hier wird die Technologiereife als hoch eingeschätzt. Sie ist ebenfalls geeignet für Langstreckenflugzeuge, bei denen eine Gewichtsreduktion sinnvoll ist. Potenziell nachteilig wirken sich die verlängerte Reisezeit und die an Flughäfen entstehenden erhöhten Emissionen aus – auch wenn die Gesamtemissionen sinken. Es muss daher abgewogen werden, ob die mit zusätzlichen Zwischenlandungen verbundenen Kosten die direkten Betriebskosten übersteigen oder nicht. Nach Tyagi/Crossley (2009) wird der Effizienzvorteil durch das Hinzufügen von mehr als einem Tankstopp aufgrund der zusätzlichen Reisezeit zu nichtegemacht (Afonso et al. 2023).

Flugplanung

Eine optimierte Flugplanung auf der Ebene der Fluggesellschaften und des Flugverkehrsmanagements (ATM) hat das Potenzial, die Emissionen bei der Durchführung von Flügen zu senken (Afonso et al. 2023). So sind insbesondere effiziente Belegungsraten zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs pro Passagier und Kilometer aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht wünschenswert (Afonso et al. 2023). Zudem wird an zahlreichen Innovationen gearbeitet, die unerwünschte Flugphasen in Warteschleifen und Verspätungen weiter minimieren. Dies gilt insbesondere für das „Air Traffic Flow Management“ (ATFM), wie sie in den Forschungsprogrammen „Next Generation Air Transportation System“ (NextGen) der USA (FAA o.J.) und „Single European Sky ATM Research“ (SESAR) der EU (SESAR 2020) bearbeitet werden.

Flugroutenoptimierung mittels Digitalisierung

Auch betriebliche Maßnahmen können erheblich zur Effizienzerhöhung beitragen. Dazu gehören insbesondere ein verbessertes Luftraummanagement zur Vermeidung von Umwegen, effiziente Flugverfahren wie ein langsamerer Sinkflug, klimaorientierte Optimierung von Geschwindigkeit und Flugprofilen sowie eine erhöhte Flugzeugauslastung (Öko-Institut 2020b). Mithilfe fortgeschrittener Software und Algorithmen werden die effizientesten Flugrouten ermittelt, wobei Faktoren wie Wetterbedingungen, Luftverkehr und Treibstoffverbrauch berücksichtigt werden. Zudem kann so auch vermieden werden, durch bestimmte Bereiche der Atmosphäre zu fliegen, in denen besonders schädliche Klimawirkungen verursacht werden (Interviews Donus, Nagel, Rauch u. Scholz). Durch diese Maßnahmen können der Treibstoffverbrauch reduziert, Flugzeiten verkürzt und Emissionen verringert werden.

Das weitere Energieeinsparpotenzial für Flugroutenoptimierung wird als niedrig bis mittel eingeschätzt bei hoher Technologiereife (Afonso et al. 2023). Hierbei könnten Synergieeffekte mit ATM ermöglichen, dass verschiedene Schadstoffemissionen durch dieses Vorgehen reduziert werden.



Vollelektrischer Bodenbetrieb

Um einen reibungslosen Betrieb an Flughäfen zu gewährleisten, ist eine Vielzahl an Bodenequipment notwendig. Der elektrische Betrieb von z.B. Flugzeugschleppern, Förderbändern, Gepäckwagen, Toilettenwagen, Trinkwasserwagen (Flux Power 2019) und Zubringertaxis könnte den ökologischen Fußabdruck der Luftfahrt reduzieren (Afonso et al. 2023). Trotz einiger Herausforderungen technischer, rechtlicher und betrieblicher Art kommen Lukic et al. (2019) zu dem Ergebnis, dass vollelektrische Systeme das Potenzial haben, den Treibstoffverbrauch im Reiseflug um bis zu 4 % und gleichzeitig die Betriebskosten zu senken, ohne die Rollzeit zu verlängern (Afonso et al. 2023).

Verbesserung der Flughafeninfrastruktur

Über den Passagier- und Frachtverkehr hinaus tragen Flughäfen und der Bodenbetrieb zu etwa 10 % der gesamten THG-Emissionen des Luftverkehrs bei, was sich oft unverhältnismäßig stark auf die umliegenden Gemeinden auswirkt (Wolfe et al. 2014). Daher haben viele Flughäfen sich zur Dekarbonisierung und Umgestaltung ihres Betriebs verpflichtet (Oakleaf et al. 2022). Die Verbesserungen der Flughafeninfrastruktur, wie Rollwege, Start- und Landebahnen und Terminals, spielen eine entscheidende Rolle, um die Leerlaufzeiten von Flugzeugen zu minimieren und den Verkehrsfluss zu verbessern. Dadurch können der Treibstoffverbrauch am Boden reduziert, Emissionen verringert und Flughafenkapazitäten optimiert werden.

Digitale Simulation von Flugzeugsystemen (digitaler Zwilling)

Digitale Zwillinge sind virtuelle Abbilder von physischen Objekten. In der Luftfahrtindustrie lassen sich mit ihrer Hilfe die Leistungen von Anlagen in Echtzeit digital simulieren, vorhersagen und optimieren. So können die Wartungsplanung verbessert, eine höhere betriebliche Effizienz erreicht und geringere Ausfallzeiten erzielt werden (Interviews Nagel u. Rauch). Die Verwendung von digitalen Simulationen ermöglicht es zudem Flugzeugherstellern, neue Designs und Technologien virtuell zu testen, bevor physische Prototypen gebaut werden. Dies kann den Entwicklungsprozess beschleunigen, den Ressourcenverbrauch reduzieren und umweltfreundlichere Innovationen ermöglichen.

Zwischenfazit zu weiteren Innovationsbereichen

In diesem Kapitel wurden mehrere energieeffiziente Lösungen für den Boden- und den Flugbetrieb vorgestellt. Obwohl alle ermittelten Lösungen bereits einen ziemlich hohen Technologiereifegrad erreicht haben und somit theoretisch machbar erscheinen, sind insbesondere diejenigen, die die größten Änderungen am Flugbetrieb erfordern – d. h. Luftbetankung und zusätzliche Tankstopps – die vielversprechends-



ten in Bezug auf Treibstoffeinsparungen, die bis zu 21 % erreichen könnten (Afonso et al. 2023). Diese Treibstoffeinsparungen werden jedoch nur für Langstreckenflügen als realisierbar eingestuft (Afonso et al. 2023). Unabhängig von der Reichweite und der Nutzlastkapazität ist die Flugroutenoptimierung, wenn sie angemessen in die ATM- und Wettervorhersagesysteme integriert ist, eine vielversprechende Option für den aktuellen Flugbetrieb (Afonso et al. 2023).





6 Klimaneutrale Luftfahrt in Deutschland

Um klimaneutrale Luftfahrt in Deutschland zu erreichen, ist eine Mischung aus unterschiedlichen innovativen Technologien nötig. Dabei wird das Erreichen von Klimaneutralität in der Luftfahrt geprägt von zahlreichen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, ökologischen und politischen Treibern und Barrieren. Zudem zeichnet sich das hiesige Innovationssystem Luftfahrt durch zahlreiche Stärken und Schwächen aus, die eine künftige Gestaltung prägen können.

6.1 Technologiemix für die Zukunft

Kapitel 5 gibt einen umfassenden Überblick über die unterschiedlichen Innovationsbereiche und ihr jeweiliges Potenzial für das Erreichen der Klimaneutralität der Luftfahrt. Angesichts des aktuellen Stands der Technik wird deutlich: Keine der betrachteten Strategien ist für sich genommen ausreichend, um die Emissionsziele zu erreichen (Teoh/Khoo 2016). Aus diesem Grund braucht es eine Kombination unterschiedlicher Maßnahmen, die die jeweiligen Stärken und Schwächen der Innovationen sowie unterschiedliche Anwendungsbereiche berücksichtigt. Mit einer intelligenten Mischung lassen sich die einflussreichsten Dekarbonisierungspfade realisieren (Oakleaf et al. 2022), wobei nicht nur ökologische Aspekte zu beachten, sondern auch wirtschaftliche, menschliche, betriebliche und energetische Beiträge zu leisten sind. Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung, Emissionssenkung und Unternehmensinnovation können von einer ganzheitlichen Sichtweise profitieren, die das komplette Innovations- und Betriebssystem in den Blick nimmt und innovative Ansätze so kombiniert, dass Synergieeffekte entstehen (Oakleaf et al. 2022).

Wie im Kapitel 5 deutlich wurde, hat jede der vorgestellten Optionen ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Zudem haben die Technologien unterschiedliche Technologiereifegrade. Es muss abgewogen werden, unter welchen Umständen es sinnvoll ist, dass eine bestimmte Technologie zum Einsatz kommt und wenn ja, ob und wie sie mit anderen Innovationen kombiniert werden kann, um Synergieeffekte zu nutzen.

Zukünftig wird eine klimaneutrale Luftfahrt durch einen Technologiemix gekennzeichnet sein.

Tabelle 4 zeigt in vereinfachter Form, welche Energieoptionen in welchem Zeitraum und für welche Flugstrecken einen breiten Einsatz finden könnten. Es wird deutlich, dass bestimmte Technologien zunächst für bestimmte Flugstrecken sinnvoll sind. SAF stellen dabei den wichtigsten Innovationsbereich mit kurzfristigem Zeithorizont dar, da sie bereits heute in der Bestandsflotte einsetzbar sind und hier kurzfristig Emissionen senken können. Jedoch sind SAF ab 2025 nur als Beimischung bis max. 2% zugelassen. Eine weitere Stärke von SAF besteht darin, dass sie auch für Langstrecken und große Passagierzahlen einsetzbar sind – der Anwendungsfall, dessen klimafreundliche Gestaltung aktuell die meisten Herausforderungen mit sich bringt (Eurocontrol 2023). Hybride Antriebskonzepte haben das Potenzial, ab 2030 auf Re-



gionalstreckenflügen, ab etwa 2040 auf Kurzstreckenflügen und ab etwa 2050 auf Mittelstreckenflügen zum Einsatz zu kommen (ATAG 2021).

Tab. 4 Überblick über Zeithorizonte und Technologieverfügbarkeit in der Luftfahrt

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Pendelflug <ul style="list-style-type: none"> • 9–50 Sitze • < 60 min. Flugzeit • < 1 % CO₂-Emissionen 	SAF	elektrisch und/oder SAF	elektrisch und/oder SAF	elektrisch und/oder SAF	elektrisch und/oder SAF	elektrisch und/oder SAF	elektrisch und/oder SAF
Regionalstrecke <ul style="list-style-type: none"> • 50–100 Sitze • 60–90 min. Flugzeit • ~ 3 % CO₂-Emissionen 	SAF	SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF
Kurzstrecke <ul style="list-style-type: none"> • 100–150 Sitze • 45–120 min. Flugzeit • ~24 % CO₂-Emissionen 	SAF	SAF	SAF	SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF	elektrisch oder Wasserstoffverbrennung und/oder SAF
Mittelstrecke <ul style="list-style-type: none"> • 100–250 Sitze • 60–150 min. Flugzeit • ~24 % CO₂-Emissionen 	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF ggf. Wasserstoff
Langstrecke <ul style="list-style-type: none"> • 250+ Sitze • 150+ min. Flugzeit • ~30 % CO₂-Emissionen 	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

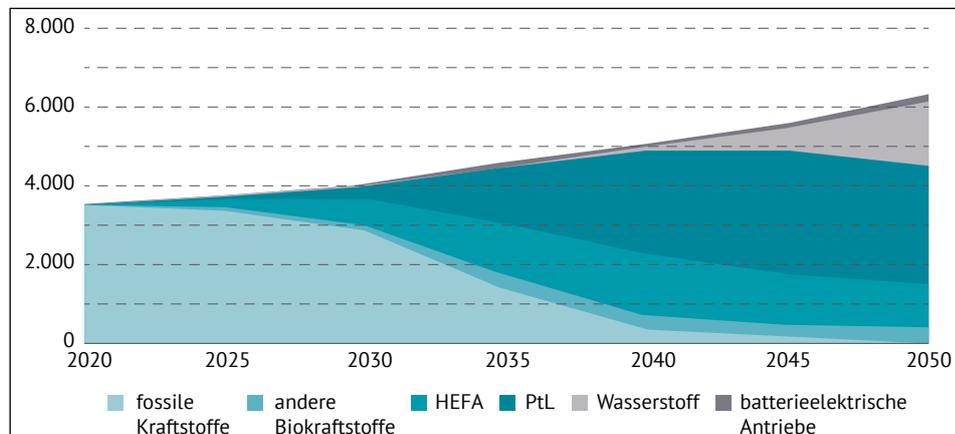
Eigene Zusammenstellung nach ATAG 2021, S.54

Die Kernherausforderung bei der Entwicklung und Implementierung neuer Lösungen in der Luftfahrtbranche ist die lange Dauer, bis ein Produkt den Markt erreicht, u.a. aufgrund von Genehmigungsverfahren, Zertifizierungen und Sicherheitsauflagen. Daher müssen Flugzeughersteller derzeit parallel in die Entwicklung unterschiedlicher Technologien investieren. Aus diesem Grund ist es wahrscheinlich, dass sich die Technologien durchsetzen, die aktuell bereits einen hohen Technologiereifegrad besitzen.

Abbildung 17 zeigt eine angenommene ideale Entwicklung der Technologien bis 2050, die dazu führt, dass trotz eines anzunehmenden Anstiegs der benötigten Flugtreibstoffenergie fossile Kraftstoffe schrittweise durch alternative Technologien ersetzt werden können (Topsoe o.J.). Fossile Brennstoffe werden zunächst weiter-



Abb. 17 Technologiepfade und Beiträge zur Klimaneutralität



Quelle: nach Topsoe o.J.

hin eine Rolle spielen und könnten künftig nach und nach von SAF – insbesondere HEFA – und PtL-Kraftstoffen ersetzt werden. Wasserstoffantriebe kommen etwa erst ab 2040 ins Spiel und weisen im Verhältnis bis 2050 nur einen geringen Anteil auf. Auf batterieelektrische Flugzeuge entfällt bis 2050 mit Abstand der geringste Anteil.

Abschließend lässt sich festhalten: Es ist davon auszugehen, dass es vermutlich noch mindestens 20 bis 30 Jahre dauern wird, bis die vorgestellten Innovationen in relevanter Größe zur Anwendung kommen, da die Technologie entweder noch nicht ausgereift ist oder die verfügbaren Mengenpotenziale der Kraftstoffe kurzfristig nicht ausreichend sind (Öko-Institut 2020b). Um das Potenzial von SAF nutzen zu können, sind erhebliche Ausweitungen der Produktionskapazitäten erforderlich, bei paralleler Erhöhung der Beimischquoten und Durchführung von Zulassungsverfahren.

6.2 Treiber und Barrieren für eine klimaneutrale Luftfahrt

6.2.1 Gesellschaft

Wertewandel und gesellschaftlicher Diskurs

Obwohl Klimawandel und -politik mittlerweile in Deutschland gesellschaftlich breit diskutiert werden, besteht längst noch keine einheitliche Meinung hinsichtlich erforderlicher Maßnahmen (Fücks et al. 2023, S.4). Vielmehr gibt es besonders umstrittene Bereiche, wie beispielsweise die Mobilität, in denen einerseits die Notwendigkeit einer Dekarbonisierung gesehen wird, andererseits aber nur eine geringe Bereitschaft besteht, erforderliche Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Dementsprechend sind gesellschaftliche Debatten zunehmend emotionalisiert. Ein Risiko besteht darin, dass in Abhängigkeit von den jeweiligen Begleitumständen, wie etwa



der individuellen wirtschaftlichen Situation, die Klimapolitik im Bereich Verkehr als weniger wichtig erachtet wird als andere Politikfelder (Interview Nagel).

Ein Wertewandel, der zu einem Rückgang von Flugreisen führt, ist gegenwärtig nur schwer zu erkennen.

Ein Wandel der Werteinstellungen, die Entscheidungen über die Wahl der Verkehrsmittel beeinflussen, ist gegenwärtig nur schwer zu erkennen. Eine repräsentative Befragung in Deutschland zeigt beispielsweise für den Privatbereich,²⁸ dass das Flugzeug an dritter Stelle nach dem Pkw und der Bahn rangiert, wenn Reisen für private Anlässe wie Urlaub, Familienbesuche o.Ä. durchgeführt werden (Berneiser et al. 2020, S.6). Immerhin etwas mehr als 10% der Befragten geben an, künftig weniger fliegen zu wollen, aber beinahe 80% beabsichtigen, eine vergleichbare Anzahl an Flügen wie bislang durchzuführen. Begründet wird eine geplante Reduzierung der Flugreisen von einem Viertel der Befragten mit Klimaschutz²⁹ (Berneiser et al. 2020, S.13f.). Inwieweit die Erfahrungen während der COVID-19-Pandemie einen dauerhaften Wandel dieser Einstellung bewirken, ist gegenwärtig nur als Szenarien darstellbar, die lediglich Aufschluss über mögliche alternative, nicht aber sich konkret abzeichnende Entwicklungen geben (Michelmann et al. 2023). Ein Großteil der Deutschen hat, zumindest gegenwärtig, nur ein geringes Umweltbewusstsein (Stichwort Flugscham) hinsichtlich Flugreisen (YouGov 2023), sodass davon ausgegangen werden kann, dass ein möglicher anhaltender Wertewandel, der zu einer bewussten Reduzierung der Flugreisen führt, sich sehr langsam entwickeln wird.

Auch auf dem Feld der Geschäftsreisen könnte es als Effekt der COVID-19-Pandemie zu einem Umdenken kommen und Geschäftsreisen zugunsten der Nutzung moderner



28 Die Aussage stützt sich auf eine repräsentative Befragung, die im Oktober 2019 durchgeführt wurde. Die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie sind daher bei den Ergebnissen nicht berücksichtigt.

29 Weitere Gründe sind die Kosten für den Flug, die Kosten für Reisen insgesamt, Änderungen im Privatleben sowie im beruflichen Bereich.



Kommunikationsmittel vermieden werden (Gelhausen et al. 2021, S.8). Zunehmend spielen Nachhaltigkeitsgründe eine Rolle bei der Gestaltung von Geschäftsreisen, z.B. bei der Wahl des Verkehrsmittels oder der Anzahl der Reisen (VDR 2022, S.19). Eindeutige Tendenzen sind allerdings noch nicht erkennbar.

Statistisch gesehen erreicht die Anzahl sowohl privater Flugreisen als auch von Geschäftsreisen schon wieder annähernd das Niveau von 2019, wenngleich der Wiederanstieg im Privatbereich schneller zu verlaufen scheint als im Bereich der Geschäftsreisen (Destatis 2023).

Bevölkerungswachstum und Mobilitätsbedürfnis

Wesentliche Treiber für die künftige Entwicklung der weltweiten Luftfahrt sind das Bevölkerungswachstum, ein steigendes Mobilitätsbedürfnis sowie die wirtschaftlichen Möglichkeiten, die es Menschen erlauben, sich Flugreisen zu leisten.

Global betrachtet soll die Weltbevölkerung bis 2100 weiter wachsen, wenngleich nicht in dem Maße wie bisher. Schätzungen zufolge sind zwischen ca. 80 bis 90 % der Weltbevölkerung noch nie geflogen (Gössling/Humpe 2020). Ein steigendes Mobilitätsbedürfnis zusammen mit einer wachsenden Weltbevölkerung lässt die Nachfrage nach Flügen steigen. Dementsprechend zeigen Prognosen, dass 2050 bereits 10 Mrd. Menschen jährlich Flugreisen unternehmen könnten (Kap. 2.3).

In Deutschland fliegen insbesondere Menschen in den Altersgruppen der unter 30-Jährigen (29 %) bzw. der unter 40-Jährigen (54 %) (ADV 2023). Diese Altersgruppen werden angesichts der demografischen Entwicklung in Deutschland perspektivisch kleiner. Allerdings verläuft diese Entwicklung nicht überall auf der Welt gleich verteilt, sondern es wachsen die Altersgruppen, die Flugreisen unternehmen (ATAG 2021, S.35 ff.). Angesichts des weltweiten Bevölkerungswachstums werden die größten Zuwächse an Flugpassagieren in der Weltregionen Asien-Pazifik erwartet (Gössling/Humpe 2020, S.5).

Auch Wohlstandsveränderungen haben Auswirkungen auf die Nachfrage nach Flugreisen. Ein zunehmender individueller Wohlstand geht einher mit einem steigenden Bedürfnis, Flugreisen zu unternehmen (EREA 2020, S.13). Langfristig gesehen gibt es auch einen positiven Zusammenhang zwischen der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) und der Nachfrage nach Flugreisen (Eurocontrol 2022, S.5). Anhand der Veränderungen der jeweiligen BIP lassen sich geografische Schwerpunkte der künftigen Nachfrage nach Flugreisen ausmachen. Beinahe die Hälfte der globalen Mittelschicht dürfte 2030 in China und Indien zu Hause sein, sodass in diesen beiden Ländern der stärkste Nachfragezuwachs nach Flugreisen erwartet werden kann (EREA 2020, S.19).



Nachfrageveränderungen und Zahlungsbereitschaft

Die Entwicklung in der Luftfahrt ist auch abhängig von Veränderungen der Nachfrage nach Flugreisen sowie von der Kaufkraft der Passagier/innen. Bereits zuvor wurde das Verhältnis von wirtschaftlicher Entwicklung und Flugreisen dargestellt, daher geht es nachfolgend um die mögliche Entwicklung von Ticketpreisen sowie die individuelle Zahlungsbereitschaft.

In der Vergangenheit ist Fliegen für viele Menschen bezahlbar gewesen und Geschäftsmodelle wie Billigfluggesellschaften (Low Cost Carrier) konnten eine wachsende Nachfrage bedienen bzw. diese z. T. auch erst erschaffen. Günstige Ticketpreise waren möglich, da Treibstoffkosten über einen Zeitraum von rund 20 Jahren niedrig waren bzw. sanken, während die Treibstoffeffizienz anstieg. Auch niedrige Personalkosten, günstige Anschaffungs- und Betriebskosten für Flugzeuge sowie der verstärkte Bau neuer Flughäfen trugen dazu bei, dass Flugticketpreise mitunter weit unter vergleichbaren Alternativen lagen, etwa Bahnreisen (Bopst et al. 2019b, S.10).

Im Zuge der COVID-19-Pandemie mussten Sitzplatzkapazitäten u.a. deshalb reduziert werden, weil weniger Personal verfügbar war. Jedoch zeigt sich mittlerweile ein erheblicher Nachholeffekt, der zu einem Ungleichgewicht zwischen angebotenen und nachgefragten Kapazitäten führt, da das fehlende Personal bislang nicht vollständig ersetzt werden konnte. Angesichts eines immer noch knappen Angebots, auch an verfügbaren Flugzeugen, können Fluggesellschaften erheblich teurere Tickets verkaufen (FAZ 2023); zum Teil entspricht das Preisniveau eines Inlandsfluges aktuell dem einer früheren Transatlantikreise (Machatschke 2023, S.61). Auf Flügen zwischen Europa und den USA gab es 2022 Preissteigerungen um bis zu 23 % (Tageschau 2023b), auf Inlandsflügen zwischen 20 und 25 % (Machatschke 2023, S.61).

Neben dem Flugpreis fließen in den Ticketpreis Steuern und Gebühren sowie Servicepauschalen ein. In den Flugpreis fließen die Kosten für Kerosin ebenso ein wie Gebühren für Gepäckbeförderung und weitere Dienstleistungen, wie Verpflegung, Sitzplatzwahl etc. Künftig dürften sich einzelne Bestandteile der Ticketpreise verteuern. Das kann dann der Fall sein, wenn beispielsweise die Nutzung von E-Fuels oder SAF zunehmend erforderlich wird und die Kosten für diese alternativen Kraftstoffe höher als die für Kerosin bleiben.³⁰ Zudem könnte es künftig für Fluggesellschaften noch erforderlicher sein, externe Effekte³¹ zu internalisieren (EREA 2020, S.55), also beispielsweise Gesundheitsschäden durch Lärmbelastung, Luftschadstoffe oder die negativen Effekte auf Natur und Flächen sowie die negative Klimawirkung verursachergemäß einzupreisen. Dies könnte zu Kosten- und ggf. auch zu Preissteigerungen

30 Für eine Gegenüberstellung der möglichen Preisentwicklungen in drei Szenarien z.B. Eurocontrol 2022, S.19.

31 Einen allgemeinen Überblick über externe Effekte und Kosten des Verkehrssektors bieten beispielsweise Bieler/Sutter (2019).



führen. Nicht nur angesichts der Lücke zwischen Angebot und Nachfrage dürften die Preise also weiterhin hoch bleiben bzw. ansteigen.

Die Erholung der Nachfrage schreitet voran (Kap. 2.3). Zwar ist das Niveau des Jahres 2019 drei Jahre später noch nicht wieder erreicht, allerdings verläuft diese Entwicklung in einzelnen Ländern bzw. Regionen mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten und hat in den USA beispielsweise das Vorkrisenniveau bereits wieder übertroffen (IATA 2023a, S.2). Ähnliche Entwicklungen zeichnen sich auch in China und Indien ab (IATA 2023a, S.2f.). In Europa wird generell ein Wachstum der Nachfrage für den Zeitraum bis 2050 prognostiziert, allerdings ist diese Entwicklung abhängig von den Kapazitätsgrenzen der Flughafeninfrastruktur (Eurocontrol 2022, S.7ff.).

Angesichts der erwarteten Verteuerung der Ticketpreise und der steigenden Nachfrage wird die Entwicklung der Zahl der Flugpassagier/innen und Flugreisen auch davon abhängig sein, ob die individuelle Zahlungsbereitschaft derart ausgeprägt ist, dass die höheren Ticketpreise auch bezahlt werden. Zumindest kurzfristig, also innerhalb eines Jahres, haben beispielsweise rund ein Drittel der Deutschen angedeutet, auf Flugreisen angesichts der Preisentwicklung verzichten zu wollen. Ein weiteres Fünftel hält dies ebenfalls für eher wahrscheinlich (YouGov 2022). Auch die individuelle Kaufkraft, abhängig von der Entwicklung der Inflation, kann die Nachfrage beeinflussen. Zumindest weltweit betrachtet scheint der Höhepunkt der Inflation erreicht. Zudem verbleibt die Arbeitslosigkeit auf niedrigem Niveau, sodass Menschen also über Einkommen verfügen (IATA 2023a, S.1 f.).

Zukünftig dürften Flugreisen teurer werden. Fraglich ist, ob die Zahlungsbereitschaft ebenfalls zunimmt.

Sicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz

Flugzeuge gelten statistisch gesehen (auf die Beförderungskilometer bezogen) als die sichersten Verkehrsmittel weltweit (IATA 2023b). Dennoch erregen Flugzeugabstürze, insbesondere großer Passagierflugzeuge, erhebliche öffentliche Aufmerksamkeit (BDL 2016) (Stand 2016). Mit der Integration neuer Antriebskonzepte und der Verwendung innovativer Kraftstoffe gewinnt die Frage der Sicherheit und der Zertifizierung (Zulassung) zunehmend an Bedeutung (ATAG 2021, S.6).

Im Bereich Luftkraftstoffe gibt es verschiedene sicherheitsrelevante Aspekte, wie beispielsweise die Brennbarkeit oder die Toxizität von Kraftstoffen, die bei der Beurteilung der Sicherheit eine Rolle spielen. Generell werden hohe und zum Teil auch sehr spezielle Sicherheitsanforderungen an Flugkraftstoffe gestellt, da der Kraftstoff die einzige Energiequelle für die Erzeugung von Schub ist, während die übrigen Systemkomponenten üblicherweise redundant gestaltet sind (Cronin et al. 2022, S.2). Durch internationale Standardisierung³² wird sichergestellt, dass Flugkraftstoffe weltweit

32 Die für Flugzeugkerosin maßgeblichen internationalen Standards sind: ASTM D1655 (ASTM International o.J.a) und ASTM D7566 (ASTM International o.J.a).



verfügbar und gemäß den Standards geprüft sind. Zu den geforderten Eigenschaften gehören beispielsweise Siedeverläufe, Schmierfähigkeit, Dichte- und Korrosionseigenschaften, Heizwerte, Aromatengehalte und viele weitere (Bullerdiek et al. 2022, S.1). Sobald SAF beigemischt und schrittweise herkömmliches Kerosin ersetzt wird, müssen vergleichbar strenge Sicherheitskriterien erfüllt werden (IATA 2015, S.32).

Ähnlich strenge Spezifikationen gelten für die Verwendung von Wasserstoff, da Wasserstoff verglichen mit Kerosin einen größeren Temperaturbereich aufweist, in dem er entflammbar bzw. explosiv ist (Cabrera/de Sousa 2022, S.15). Daher sind erhebliche Vorkehrungen für die Aufbewahrung von flüssigem Wasserstoff bei Druckverhältnissen von über 100 Megapascal und Temperaturen von -253 °C zu treffen (Qazi 2022, S.7). Damit einher geht eine Neugestaltung der Tanks und des Flugzeugumpfes (Kap. 5.2.3) und somit auch eine Zertifizierung der neu entwickelten Komponenten. Vergleichbares gilt für die Nutzung von Ammoniak und Methan (Bullerdiek et al. 2022, S.71).

Werden Brennstoffzellen oder Batterien als Antriebskonzept genutzt, müssen weitere Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden. Dazu gehören beispielsweise die Vermeidung des thermischen Durchgehens, also eines Kurzschlusses und der Entzündung von Batterien, oder auch die Gewährleistung der Sicherheit der Wasserstoffaufbewahrung für Brennstoffzellen (Leipold et al. 2021, S.143; Walker 2020, S.243). Für die Sicherheit von Batterien, insbesondere für Lithium-Ionen-Batterien, gilt außerdem, dass Überhitzung durch Hochspannung vermieden werden muss. Festkörperbatterien bilden hier eine mögliche, sicherere Alternative (Adu-Gyamfi/Good 2022, S.6). Tabelle 5 gibt einen Überblick über alternative Energieträger für die Luftfahrt und enthält u.a. eine qualitative Einschätzung der Sicherheit der jeweiligen Energieträger.

Neben der Einhaltung von geltenden Sicherheitsstandards und der Weiterentwicklung entsprechender Zertifizierungsverfahren für neue Antriebskonzepte und Kraftstoffe kommt der Akzeptanz neuer Technologien eine wichtige Rolle zu (Interview Kasten). Fehlende Akzeptanz kann eine Barriere für die Einführung neuer Kraftstoffe oder auch Antriebskonzepte sein (Anderson et al. 2022, S.8).

Umfassende Analysen der gesellschaftlichen Akzeptanz von Wasserstoffflugzeugen, solchen mit hybridelektrischen Antrieben und solchen mit SAF/E-Fuels liegen bislang nicht vor. Es lassen sich aber vereinzelt Erkenntnisse anführen, die Teilaspekte betreffen. Für hybridelektrische Flugzeuge, die auf Regional- und Kurzstrecken in Deutschland genutzt werden könnten, wurde beispielsweise im Rahmen einer Befragung³³ ermittelt, dass rund drei Viertel der Befragten mit derartigen Flugzeugen

³³ Repräsentative Onlineumfrage mit mehr als 3.000 Befragten als Bestandteil des Projektes GNOSIS, das zwischen 07/2020 und 06/2023 im Rahmen des LuFo VI Call 1 gefördert wurde.



Tab. 5 Sicherheit und weitere Parameter verschiedener Energieträger (qualitativer Vergleich)

Parameter	Kerosin	Biokraftstoff	Batterien	e-Kerosin	LNG*	LH ₂ **	e-L-CH ₄
Energie	+	+	--	+	+	++	+
Volumenenergie-dichte	++	++	--	++	+/-	-	+/-
Emissionen	--	+/-	++	+/-	-	+	+/-
Kosten	++	-	+	--	++	-	-
Verfügbarkeit	++	-	-	-	+	+/-	--
Infrastruktur	++	-	+/-	+/-	+	-	+
Sicherheit	+	+	-	+	+/-	--	+/-
Kompatibilität	++	++	-	++	+/-	-	-
Luftqualität***	--	-	++	-	+	+	+
Klimawirkung	--	+/-	++	+/-	+/-	+	+/-
wissenschaftlicher Kenntnisstand Klimawirkung	mittel	mittel	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig	niedrig
Technologiereifegrad	9	8	5	7	4	3	4

* bezogen auf fossiles Flüssiggas

** bezogen auf grünen Wasserstoff

*** bezogen auf den Flugbetrieb

Eigene Zusammenstellung nach Batteiger et al. 2023, S.17

fliegen würden. Der Sicherheitsaspekt war dabei das wichtigste Attribut für alle Befragten. Sicherheitsbedenken sind ein wesentlicher Faktor für diejenigen Befragten, die nicht mit hybridelektrischen Flugzeugen fliegen würden (Bauhaus Luftfahrt o.J.).

Die gesellschaftliche Akzeptanz von SAF ist bislang noch nicht umfassend untersucht. Bisherige Erkenntnisse weisen aber auf eine grundsätzliche Offenheit gegenüber der Verwendung von SAF hin (Anderson et al. 2022, S.9). Allerdings ist die Akzeptanz u.a. von den verfügbaren Informationen abhängig. Für Biokraftstoffe allgemein konnte gezeigt werden, dass – entgegen der nahe liegenden Vermutung – die Verfügbarkeit von mehr Informationen eher zu einer negativen Einstellung führt, da oftmals Risiken bzw. negative Effekte (z.B. Veränderung der Landnutzung zur Erzeugung von Biomasse) problematisiert werden (Anderson et al. 2022, S.10).

Als weiterer Indikator für die gesellschaftliche Akzeptanz kann die (Mehr-)Zahlungsbereitschaft für klimaverträgliche Flugreisen dienen. Bereits zuvor wurde der sich abzeichnende gesellschaftliche Wertewandel dargestellt, der zu einer stärkeren Berücksichtigung der negativen Effekte auf das Klima bei der Wahl der Verkehrsmittel führen kann (Kap. 6.2.1). Bislang ist allerdings noch keine entsprechende Anpassung der Zahlungsbereitschaft feststellbar (Heib/Hildebrand 2022, S.7).



6.2.2 Wirtschaft

Investitionsumfeld zur Realisierung von Marktpotenzialen

In Deutschland sind leistungsfähige unternehmerische und institutionelle Strukturen vorhanden, um einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer klimaneutralen Luftfahrt zu leisten. Dazu gehört eine Vielzahl an Unternehmen, Forschungseinrichtungen und auch Clusterorganisationen, die Innovationen für eine klimaneutrale Luftfahrt vorantreiben. Es besteht eine enge Verzahnung zwischen den FuE-Institutionen und den Unternehmen, die Innovationen in die Anwendung bringen (Kap. 4). In Deutschland sind somit sehr viele relevante Kompetenzen im Flugzeugbau und der Technologieentwicklung für eine klimaneutrale Luftfahrt vorhanden. Auf dieser Basis kann ein Beitrag für ein klimafreundliches Wachstum und die Transformation der Luftfahrtbranche geleistet werden.

Schätzungen gehen derzeit von einer Ausweitung der Flugzeugflotte bis 2032 um ca. 50 % auf etwa 38.000 Flugzeuge aus. 2042 könnten bereits knapp 47.000 Flugzeuge, davon ca. 40.000 neue Flugzeuge, weltweit im Einsatz sein (Kap. 2.3). Somit bestehen enorme Marktpotenziale für den Einsatz von innovativen Technologien in der zivilen Luftfahrt. Auch wenn die Lebensdauer von Passagierflugzeugen und somit ebenso die Investitions- und Innovationszyklen mit etwa 30 Jahren sehr lang sind, bestehen in den kommenden Jahren enorme Absatzmärkte für neue Flugzeuge (bei hohen Markteintrittsbarrieren und großen Investitionssummen; Kap. 3.1).

Zentraler Anreizmechanismus in Europa für Investitionen in einen klimaverträglicheren Luftverkehr ist der Europäische Emissionshandel (Kap. 3.2.2). Damit möchte die Europäische Kommission Investitionen in klimafreundliche Alternativen attraktiver machen. In Bezug auf die Investitionsrahmenbedingungen für die Unternehmen bedeutet dies jedoch auch, dass zu den bestehenden Belastungen durch hohe Energiekosten, Schwierigkeiten in den Lieferketten und Inflationsdruck weitere Kosten für die Emissionszertifikate auf sie zukommen. Damit kann sich der Spielraum für Investitionen, die für den Klimaschutz dringend benötigt werden, auf der anderen Seite verringern (Bardt/Schaefer 2023). Nichtsdestotrotz wird die Steuerungswirkung der CO₂-Bepreisung als ökonomisch sehr zielführend bewertet und als eine wichtige Säule, um die Klimaziele zu erreichen.

Ebenso prägend für das Investitionsumfeld von Technologien für ein klimaverträglicheres Fliegen ist die Konkurrenzsituation zu anderen Branchen und Sektoren bei den benötigten Energieträgern. Die Konkurrenz mit anderen Branchen wie der Automobilindustrie oder der Industrie selbst kann die Preise und Verfügbarkeit von Wasserstoff beeinflussen. Investitionen in Wasserstoffproduktion und -infrastruktur sind daher stark von dieser Konkurrenzsituation abhängig. Dies könnte die Wirtschaftlichkeit von Technologien für klimaverträglicheres Fliegen beeinflussen, da die Be-



schaffung von Wasserstoffkraftstoff eine erhebliche Kostenkomponente darstellt. Die Luftfahrtindustrie muss sich in diesem Wettbewerbsumfeld positionieren und strategische Partnerschaften sowie Forschungs- und Entwicklungsinitiativen eingehen, um die Verfügbarkeit von Wasserstoff sowie E-Fuels zu fördern.

Obwohl SAF dazu beitragen können, die THG-Emissionen im Flugverkehr zu reduzieren, ist ihre Verbreitung noch gering. Das liegt u.a. an den derzeit noch hohen Kosten für SAF (Brandt et al. 2022). Die Entwicklung von Technologien zur Herstellung von SAF und die Skalierung der Produktion sind wichtige Schritte, um die Kosten zu senken. Mittelfristig werden dementsprechend Kostensenkungen für SAF erwartet (Blanshard et al. 2021; Eurocontrol 2022), sodass von einer zunehmenden Nachfrage nach SAF ausgegangen werden kann.

Fachkräftebedarf und -verfügbarkeit

Einer der Standortvorteile Deutschlands im internationalen Wettbewerb besteht in der sehr guten Fachkräftebasis (Interviews Gerhards u. Schwarz). Vor allem im Bereich Forschung und Innovation gibt es in Deutschland eine Vielzahl an Hochschulen und Forschungseinrichtungen, die die Unternehmen bei der Einführung neuer Technologien unterstützen können. Auch die Beschäftigungszahlen (Kap. 4.2) zeigen, dass es in Deutschland mehrere regionale Cluster und Clusterinitiativen gibt, in denen eine Vielzahl hochqualifizierter Beschäftigter tätig ist.

Jedoch spürt auch die Luftverkehrsbranche einen zunehmenden Fachkräftemangel. Insbesondere die Entwicklungen während der COVID-19-Pandemie hatten einen langfristigen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Fachkräften für die Branche. Die Beschäftigung des Luft- und Bodenpersonals ging während dieser Zeit um ca. 7.200 Fachkräfte zurück. Einige dieser Fachkräfte haben sich Tätigkeiten in anderen Branchen gesucht und fehlen nun, um den wiedererstarkenden Bedarf zu decken. Gleichzeitig sind auf dem Arbeitsmarkt derzeit aber keine Reserven vorhanden, um die Lücken füllen zu können (Burstedde/Koneberg 2022).

Hinzu kommt die Konkurrenz der Luftfahrtbranche zu anderen Sektoren und Branchen wie der Automobilindustrie, der Energiebranche und der Schifffahrtsindustrie, in denen ebenfalls derzeit und in Zukunft Wasserstoff- bzw. PtL-Infrastrukturen aufgebaut werden, um ihre CO₂-Emissionen zu reduzieren und ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Die Konkurrenz um Fachkräfte dürfte sich weiter verschärfen, denn die Nachfrage nach qualifizierten Mitarbeitern in diesen Branchen steigt (Aussagen Expertenworkshop; 21./29.6.2023).

Zusätzlich besteht die Problematik, dass nicht nur Fachkräfte in den klassischen, für die Luftfahrt erforderlichen Disziplinen fehlen, sondern auch interdisziplinär ausgebildete und international erfahrene Fachkräfte. Beispielsweise sind Kenntnisse in

Der Fachkräftemangel erschwert eine Nachhaltigkeits-transformation in der Luftfahrt.



den Bereichen Nachhaltigkeit, Umweltschutz und neuen Technologien gefragt, um den Herausforderungen des Klimawandels und der Entwicklung klimafreundlicherer Flugzeuge gerecht zu werden. In einer globalisierten Welt ist zudem internationale Erfahrung ein wichtiger Faktor für den Erfolg in der Luftfahrtindustrie. Die Zusammenarbeit mit Partnern aus verschiedenen Ländern erfordert interkulturelle Kompetenz und Verständnis für unterschiedliche Geschäftspraktiken und Vorschriften (Burstedde/Koneberg 2022).

Infrastrukturentwicklung

Die Luftfahrtindustrie steht bei einer stärkeren Nutzung von Wasserstoff und SAF vor der Herausforderung, die Produktions-, Transport- und Betankungsinfrastrukturen für den Wasserstoffbetrieb und die Nutzung von SAF in großen Teilen aufbauen zu müssen. Dafür ist eine enorme Skalierung der Wertschöpfungsketten rund um grünen Wasserstoff und SAF nötig. Wie in Kapitel 5.2.3 dargestellt, wären immense Wassermengen und große Flächen notwendig, um Pflanzen in der notwendigen Größenordnung zur Deckung des Bedarfs an Treibstoff der Luftfahrt anzubauen (Öko-Institut 2020b). Zudem wären extrem hohe Investitionen nötig, um die Infrastruktur zur Erzeugung dieser Kraftstoffe aufzubauen (Öko-Institut 2020b). Insbesondere für den Betrieb der Flugzeugflotten mit Wasserstoff ist das Gelingen des Aufbaus einer internationalen Wasserstoffwirtschaft elementar. Hinzu kommt sowohl bei den Raffineriekapazitäten für die Herstellung von SAF als auch von grünem Wasserstoff eine Konkurrenz zu anderen Branchen, die ebenfalls enorme Herausforderungen mit sich bringen. Diese Aktivitäten zur Infrastrukturentwicklung müssen parallel zur Flugzeugentwicklung aufgebaut werden, was insgesamt zu sehr hohen Kosten für die Luftfahrtindustrie führt (Nationaler Wasserstoffrat 2021). Hinzu kommt, dass derzeit noch nicht klar ist, welche Technologien sich langfristig durchsetzen werden (Kap. 5) und dementsprechend hohe Investitionskosten entstehen – bei gleichzeitig hoher Wahrscheinlichkeit, dass nur wenige Lösungen umgesetzt werden.

6.2.3 Umwelt

Forschung zu Effekten der Luftfahrt

Um mit Blick auf eine Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen (Kap. 3) und der optimalen Gestaltung von Forschungs- und Entwicklungsprogrammen (Kap. 4.1) die notwendige wissenschaftliche Fundierung zu erlangen, wird weltweit Forschung zu den primären und sekundären Effekten (Kap. 2.2) der Luftfahrt auf das Klima betrieben. Die Beiträge deutscher Forschungsinstitutionen werden als weltweit wegweisend eingeschätzt (Kap. 5.1). Wesentliche Bereiche sind die Atmosphärenforschung sowie die Forschung zu den Nicht-CO₂-Effekten. Auch wissenschaftliche Erkenntnisse zu den sekundären Effekten der Luftfahrt können bei der Einordnung von Maßnahmen eine Rolle spielen.



Im Rahmen der Atmosphärenforschung geht es vorrangig darum zu verstehen, wie, wo und wie lange die Emissionen der Luftfahrt auf die atmosphärische Zusammensetzung und das Klima wirken. Von diesen Erkenntnissen ausgehend sollen bestehende Vorhersagemodelle verbessert werden. Vorhersagemodelle können dann wiederum dazu genutzt werden, Flugrouten dahingehend zu optimieren, dass ein möglichst geringer negativer Einfluss auf das Klima verursacht wird (Interview Rauch). Um die Wirkung der Nicht-CO₂-Effekte in Vorhersagemodellen bestmöglich abbilden zu können, sind gegenwärtig noch Forschungslücken zu schließen. So ist beispielsweise noch nicht vollständig erklärbar, unter welchen Umständen die Nicht-CO₂-Effekte auftreten (Interview Nagel). Wie bereits ausgeführt (Kap. 2.2), sind Nicht-CO₂-Effekte in hohem Maße orts- und zeitabhängig. Zudem entfaltet sich ihre Wirkung nicht linear zum Kraftstoffverbrauch (Niklaß 2019, S.48). Das verbesserte Wissen über diese Effekte kann dazu beitragen, dass Vorhersagemodelle präziser werden, um geeignete Mitigationsmaßnahmen (Flugroutenoptimierung etc.) entwickeln zu können. Zudem können Erkenntnisse der Atmosphärenforschung unmittelbar auch in den Flugzeugentwurf einfließen, um Leistungsverluste, die durch klimafreundlichere niedrigere Flughöhen und geringere Reisegeschwindigkeiten entstehen, zu kompensieren und das Flugzeugdesign zu optimieren (Niklaß 2019, S.21). Beispielsweise könnte die Luftreibung durch das Design reduziert werden, um den Geschwindigkeitsverlust, der bei niedrigen Flughöhen entsteht, zu minimieren.

Zu den Effekten der Luftfahrt auf das Klima gehören der Energieverbrauch, insbesondere der Kraft- bzw. Kerosinbedarf, die Luftqualität und damit verbunden der Ausstoß von Luftschadstoffen mit negativem Einfluss auf die menschliche Gesundheit sowie Ökosysteme, die Belastung mit Fluglärm, die Flächeninanspruchnahme, insbesondere von Flughäfen, und letztlich auch der Ressourcenverbrauch durch den Luftfahrzeugbau (Bopst et al. 2019a, S.25 ff.). Neben den vielfältigen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sowie auf die Biodiversität in unterschiedlichen Ökosystemen ist vor allem auch die zukünftige Entwicklung dieser Effekte nur schwer antizipierbar. Die Gestaltung von unterschiedlichen Mitigationsmaßnahmen (z.B. zur Minderung des Eintrags von Luftschadstoffen oder Lärm) und die Entwicklung neuer Technologien (z.B. zur Reduzierung des Kerosinbedarfs) sind von einem möglichst vollständigen Wissensstand über die spezifischen Effekte der Maßnahmen sowie der Technologien und ihrer eventuellen Wechselwirkungen abhängig. Wenn Maßnahmen auf Basis unvollständiger oder fehlerbehafteter Wissensstände entwickelt werden, werden möglicherweise nichtintendierte Nebenwirkungen erzeugt, z.B. führen niedrigere Flugrouten zur Reduzierung des Kerosinbedarfs zugleich zu einer erhöhten Lärmbelästigung.

Effekte von Kompensationsmaßnahmen

Ein Element zur Gestaltung der klimaneutralen Luftfahrt ist die Kompensation von negativen Effekten durch geeignete Maßnahmen. Die Kompensation von THG-Emissionen wird dabei zusätzlich zur Reduktion und zur Vermeidung als Möglichkeit ge-



sehen, den Klimawandel zu begrenzen (Wolters et al. 2018, S.6). Wie zuvor dargestellt, ist dafür ein möglichst vollständiger Kenntnisstand über die Effekte der Luftfahrt auf das Klima erforderlich. Gegenwärtig gibt es allerdings noch unbeantwortete Fragestellungen zur Klimawirkung der Luftfahrt, sodass jedwede Maßnahme bislang nur teilweise (bzw. mutmaßlich) die Klimawirkung der Luftfahrt kompensieren kann.

Verschiedene
Kompensations-
maßnahmen umfassen
unterschiedliche Emis-
sionsbereiche.

Unter anderem bestehen bei verschiedenen Kompensationsmaßnahmen Unterschiede darin, welche Emissionen überhaupt kompensiert werden. Häufig sind es nur die CO₂-Emissionen und damit nur rund ein Drittel der eigentlichen Klimawirkung der Luftfahrt, die mittels Kompensationsmaßnahmen abgedeckt werden. Bisweilen gibt es auch Bestrebungen, weitere Emissionen, wie etwa Stickoxide, im Rahmen von Kompensationsmaßnahmen zu berücksichtigen. Hierzu erfolgt eine Umrechnung in die äquivalente Menge CO₂ (Schulz 2020). Hinzu kommen ebenfalls unterschiedliche Grenzen der Berücksichtigung von Emissionen, da entweder nur die Emissionen eines Fluges mit in die Berechnung des Umfangs der Kompensation einfließen oder aber auch die Emissionen weiterer Stellen, wie etwa der Flughäfen, mit betrachtet werden. Außerdem spielen weitere spezifische Faktoren, wie etwa die Auslastung eines Flugzeugs, die Route oder auch die Reiseflughöhe, eine Rolle bei der Berechnung des jeweiligen Ausstoßes von THG-Emissionen (Pilz 2023) und damit des Kompensationsbedarfs.

Fluggesellschaften können entweder verpflichtet werden, ihre Emissionen zu kompensieren, dies freiwillig tun, oder aber die Verantwortung für die Kompensation ihren Passagieren übertragen. Die Passagiere wiederum können üblicherweise zwischen verschiedenen Flugpreisen wählen und somit freiwillig entscheiden, ob sie Mehrkosten zur Kompensation von Klimawirkungen tragen wollen.

Um den Transfer der finanziellen Mittel zu entsprechenden Klimaschutzprojekten zu gewährleisten, haben sich dezidierte Akteure wie etwa Atmosfair, Myclimate, Klima-Kollekte oder Primaklima etabliert. Diese bieten Kompensationszertifikate an. Vergleichbar zum Emissionshandel wird für jede eingesparte Tonne CO₂ ein Zertifikat ausgegeben (Öko-Institut o.J.d).

Die Klimaschutzprojekte, die durch die Kompensationsmaßnahmen unterstützt werden, sind vielfältig und reichen von Waldaufforstung bzw. Waldschutz über Maßnahmen zum Schutz von Mooren, Projekten zum Ausbau erneuerbarer Energien, zur Erzeugung von Biomasse bzw. Biogas bis hin zu Projekten, die ineffiziente Koch- und Heizstellen durch moderne Öfen ersetzen (Wolters et al. 2018, S.11 ff.). Auch der Kauf und die anschließende Nichtnutzung von CO₂-Zertifikaten oder der Einsatz von SAF sind Möglichkeiten, die Klimawirkung zu kompensieren (Königs 2021).

Zum Teil bestehen erhebliche Unterschiede bei den Kosten für derartige Kompensationsmaßnahmen, die an die Kund/innen von Fluggesellschaften weitergereicht werden. Die Spanne reicht dabei von 8 bis 70 Euro/t CO₂ (Schulz 2020), wobei selbst



70 Euro als zu niedrig angesetzt gelten. Würden stattdessen die sozialen CO₂-Kosten³⁴ angesetzt, so müssten durchschnittlich 170 Euro/t CO₂ für Kompensationsmaßnahmen veranschlagt werden (Rennert et al. 2022).

Dabei ist zu beachten, dass die Vielzahl der Maßnahmen mitunter durch sehr unterschiedliche Qualität und Wirksamkeit gekennzeichnet ist. Bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen spielen Qualitätsstandards, die eine Beurteilung anhand festgelegter Kriterien (Wolters et al. 2018, S.25 ff.) ermöglichen, eine Rolle bei der Betrachtung der Wirksamkeit von Kompensationsmaßnahmen. Internationale Standards, wie der Gold Standard, werden flankiert von nationalen und regionalen Standards, deren Einhaltung durch unabhängige Stellen geprüft werden sollte (Wolters et al. 2018, S.23).

Allerdings sind mit Kompensationsmechanismen Effekte verbunden, die die positive Wirkung konterkarieren können. Insbesondere kann es zu Reboundeffekten kommen, wenn etwa Flugreisen durchgeführt werden, die ohne verfügbare Kompensationsmaßnahmen nicht durchgeführt worden wären (Öko-Institut o.J.b). Zudem scheint bislang die Bereitschaft zur Kompensation in Deutschland eher gering ausgeprägt zu sein. 85 % der Deutschen haben 2019 angegeben, noch nie die Emissionen einer Flugreise kompensiert zu haben. Dies immer zu tun, gab nur 1 % der Befragten an (Berneiser et al. 2020, S.15). Weiterhin besteht das Risiko, dass die Minderung durch Klimaschutzprojekte nur von zeitlich begrenzter Dauer ist, etwa, wenn Bäume gepflanzt oder Moore renaturiert werden, die zu einem späteren Zeitpunkt beispielsweise durch Abbrennen das aufgenommene CO₂ wieder freizusetzen (Öko-Institut o.J.a).

Aufgrund der Vielfältigkeit der Maßnahmen ist es schwierig, die Wirksamkeit der Kompensationsmaßnahmen zu quantifizieren. Angesichts des Umstandes, dass zum einen das erforderliche Wissen über die Klimawirkung der Luftfahrt unvollständig ist und damit auch Kompensationsmaßnahmen bislang nicht vollständig die negativen Effekte auf das Klima ausgleichen, und dass zum anderen die Möglichkeit zur Kompensation nicht zur Vermeidung von Emissionen führt, können derartige Maßnahmen allenfalls kurzfristig und im begrenzten Umfang zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt beitragen.

6.2.4 Politik

Instrumentenmix/Schwerpunktsetzung

Die Rolle der Politik bei der Gestaltung eines möglichst klimaneutralen Luftverkehrs wird grundsätzlich als sehr wichtig angesehen. Von verschiedenen Seiten wird angemerkt, es sei entscheidend, eine sinnvolle Mischung an politischen Instrumenten

³⁴ Die sozialen bzw. gesellschaftlichen Kosten von CO₂ sind eine Metrik für eine monetäre Betrachtung der Schäden, die einer Gesellschaft durch den Ausstoß einer zusätzlichen Tonne CO₂ entstehen.



umzusetzen, also Marktregulierung und -anreize entsprechend auszutarieren und gleichzeitig breite Förderinitiativen für Forschung und Entwicklung sowie Unterstützung beim Aufbau der notwendigen Infrastruktur zu implementieren (Interviews Cames, Grimme u. Kasten; Expertenworkshop; 21.6.2023).

Eine Verschärfung aktueller Regelungen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene ist notwendig, um Luftfahrt klimafreundlicher zu gestalten.

Aus Klimaschutzperspektive wird insbesondere eine Verschärfung der aktuellen Regelungen auf deutscher, europäischer sowie internationaler Ebene angemahnt, um wirkungsvolle Anreize zur Emissionsreduzierung zu setzen. „Privilegierungen des Luftverkehrs in der Besteuerung und CO₂-Bepreisung – insbesondere im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern und Sektoren“ sollten demnach reduziert oder komplett abgeschafft werden (Siemons et al. 2021). Als Beispiele für diese Privilegierungen werden Mehrwertsteuer sowie Energiesteuern genannt, die für die meisten Flüge nicht oder nur reduziert erhoben würden (Siemons et al. 2021). Bei der Verschärfung der Bepreisung von CO₂-Emissionen im Luftverkehr spielt der EU-EHS eine zentrale Rolle (Kap. 3.2.2). Allerdings wird teilweise kritisiert, dass durch die Fokussierung auf den EU-EHS als wichtigstes Instrument die politische Diskussion häufig verengt wird und andere wichtige Ansätze wie beispielsweise die Optimierung von Flugrouten zu wenig betrachtet werden (Expertenworkshop; 21.6.2023). Im Kontext des EU-EHS ist des Weiteren zu beachten, dass dieses aktuell Nicht-CO₂-Effekte nicht einbezieht. Daher ist es von besonderer Bedeutung, effektive Lösungen zur Reduzierung von Nicht-CO₂-Effekten zu entwickeln, und diese idealerweise in den EU-EHS zu integrieren (Interview Grimme).

Die Bedeutung des Zusammenspiels unterschiedlicher politischer Instrumente – sowie die Austarierung der Interessen unterschiedlicher Akteure – wird beispielsweise vor dem Hintergrund der Entwicklung der ReFuelEU-Aviation-Verordnung deutlich, die u.a. die Festlegung von Quoten für die Beimischung erneuerbarer Flugkraftstoffe sowie eine Tankpflicht enthält. Hersteller von Kerosin monieren etwa, dass Quoten für die initiale Markteinführung von SAF nur bedingt geeignet seien, da erste Produktionsanlagen voraussichtlich deutlich teurer sein werden als nachfolgende. Für Erstinvestoren bestehe damit ein großes Investitionsrisiko. Geeigneter seien stattdessen langfristige Abnahmeverpflichtungen für PtL-Kraftstoffe, ähnlich beispielsweise einer Einspeisevergütung bei erneuerbarem Strom. Auf diese Weise können Risiken für erste Investitionen reduziert werden (aireg 2023). Das heißt, es wird die Bedeutung eines langfristig verlässlichen Markt- und Investitionsumfeldes angemahnt. Dies würde auch die Gefahr reduzieren, dass Unternehmen und Investoren ggf. in die USA abwandern, wo eine attraktivere Anreizstruktur für die Produktion von SAF geschaffen worden sei (airliners.de 2023; Fücks et al. 2023).

Verstärkte FuE-Förderung

Der Luftfahrtsektor ist geprägt von vergleichsweise langen Entwicklungs- und Zulassungszeiträumen für neue Technologien. Die Entwicklung und Zulassung neuer



Flugzeugdesigns oder Triebwerke dauert schätzungsweise bis zu 15 Jahre, die Marktdurchdringung dann noch einmal bis zu 30 Jahre (Fücks et al. 2023). Daher bedarf es einer erheblichen Steigerung öffentlicher und privatwirtschaftlicher Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie einer Beschleunigung von Entwicklungszyklen und Zulassungsverfahren (Fücks et al. 2023). Als Beschleunigungstreiber auf nationaler Ebene könnte die staatliche Förderung eines Demonstratorprogramms dienen, wie es die USA derzeit bereits umsetzen (Gipson 2023). Ein solches Programm könnte die rasche Anwendung und Erprobung zahlreicher neuer Technologien ermöglichen und Innovationszyklen deutlich beschleunigen (Interview Belitz/Berndes).

Zulassung, Zertifizierung, Standardisierung

Für synthetische Flugkraftstoffe/E-Fuels existieren bislang noch keine einheitlichen Standards bzw. Zertifizierungen, die deren Nachhaltigkeit transparent darstellen (Bundesregierung 2021). Derartige Standards in Bezug auf Nachhaltigkeit und Sicherheit gelten als sehr wichtig, um die gesellschaftliche und politische Akzeptanz für deren großflächigen Einsatz sicherzustellen (Interview Kasten). Hierfür kann auf die Erfahrung aus ähnlichen Prozessen für Biokraftstoffe oder Strom aus Erneuerbaren Energien aufgebaut werden (Bundesregierung 2021). Auch aus internationaler Perspektive spielt die Entwicklung harmonisierter bzw. gegenseitig anerkannter Nachhaltigkeitsstandards und Zertifizierungen, etwa für Erzeugung, Transport und Vertrieb von Wasserstoff und seinen Derivaten, eine große Rolle. In der nationalen Wasserstoffstrategie wird etwa von der Etablierung „gleichermaßen robuster sowie innovativer und digitaler Zertifizierungslösungen“ in möglichst vielen Ländern gesprochen (Bundesregierung 2023). Von besonderer Bedeutung ist dies für außereuropäische Importregionen sowie Länder, mit denen Deutschland eine Wasserstoffpartnerschaft unterhält oder anstrebt. Auf diese Weise kann die tatsächliche Klimaschutzwirkung beispielsweise von SAF transparent dokumentiert werden. Ent-





sprechende Zertifizierungen und Standardisierungen tragen weiterhin zur Investitionssicherheit bei und verbessern die Rahmenbedingungen für einen fairen und transparenten internationalen Wettbewerb. Auch hinsichtlich der Sicherheit und Zulassung nachhaltiger Kraftstoffe spielen Standardisierungen und Zertifizierungen eine wichtige Rolle. Beispielsweise geht es um die Frage, wie in Zukunft aromatenfreie³⁵ SAF zugelassen werden können. Derzeit können bis zu 50% der bereits zugelassenen nachhaltigen Flugkraftstoffe per Drop-in beigemischt werden. Sobald der Beimischungsanteil über 50% steigen soll, muss die Auswirkung auf das Antriebssystem untersucht und erprobt werden. Dabei würde ein weitgehend aromatenfreier Treibstoff die Anzahl an Rußpartikeln als „Kondensationskeime für Eiskristalle in Kondensstreifen“ verringern, „was wiederum die Klimawirkung von Kondensstreifen deutlich reduzieren würde (DLR o.J.a). Einige Experten fordern daher, den verpflichtenden Aromatenanteil im Kerosin auf das Mindestmaß zu reduzieren und ebenfalls einen Weg zu eröffnen, um komplett aromatenfreie SAF zuzulassen (Expertenworkshop; 21.6.2023).

Bereits jetzt kann eine Reduzierung des Aromaten- und Schwefelanteils im Kerosin dazu beitragen, klimaschädliche Effekte der Luftfahrt zu verringern.

Eine Reduzierung des Aromaten- und Schwefelanteils im Kerosin kann zur Verringerung der klimaschädlichen Nicht-CO₂-Effekte beitragen (Faber et al. 2022). Ein Effekt dieser Absenkung der Anteile von Aromaten und Schwefel ist eine zunehmende Energiedichte des Kerosins (Faber et al. 2022, S.36) sowie eine Verringerung des Wartungsbedarfs der Triebwerke. Die Anteile von Aromaten und Schwefel können durch Beimischung von aromatenfreien SAF gesenkt werden, wie etwa im Rahmen der ReFuelEU-Aviation-Verordnung vorgesehen, oder auch durch zusätzliche Prozessschritte, die entweder eine Umwandlung der Aromaten oder deren Trennung aus dem Kerosin zum Ziel haben (Faber et al. 2022, S.42 ff.). Da die jeweiligen Aromatenanteile in Abhängigkeit des verwendeten Rohöls variieren und lediglich ein maximaler Anteil gemäß internationaler Standards zulässig ist (25%), ist ein technischer Prozess zur Reduzierung dieses Anteils zunächst davon abhängig den Anteil zuverlässig bestimmen zu können. Daher spielt das zuvor genannte vorgesehene Monitoring eine wichtige Rolle bei der Erzielung kurzfristiger Effekte, denn die schrittweise Reduktion der Aromatenanteile im Kerosin auf Grundlage der Erfassung dieser Anteile kann die klimaschädliche Wirkung der Kraftstoffverbrennung senken.

6.3 Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems

Das deutsche Luftfahrtinnovationssystem weist deutliche Stärken wie auch einige Schwächen auf. Die langjährigen Innovationsaktivitäten haben zur Herausbildung eines international bedeutsamen Innovationsökosystems geführt, innerhalb dessen ein Großteil der Wertschöpfungsstufen der Luftfahrt abgedeckt wird. Durch Berück-

³⁵ Aromate sind zyklische Kohlenwasserstoffe und chemische Bestandteile von Kerosin. Umso niedriger der Anteil von Aromaten im Kraftstoff ist, desto weniger Ruß befindet sich in den Emissionen. Da Rußpartikel „als Kondensationskeime für Eiskristalle in Kondensstreifen“ fungieren, sinkt mit dem Aromatenanteil auch die Bildung von Kondensstreifen (DLR o.J.a).



sichtigung der Anforderungen an klimaneutrale Flugzeuge könnte Deutschland zum (Mit-)Gestalter einer klimaneutralen Luftfahrt werden.

In Deutschland haben sich verschiedene regionale Schwerpunkte gebildet, an denen eine enge Verzahnung zwischen Hochschulen, Forschungsinstitutionen und Industrie vorhanden ist. So besteht ein hohes Maß an Qualifizierungsmöglichkeiten für Fachkräfte, die dadurch über theoretisches und praktisches Know-how verfügen. Darüber hinaus ist die Qualifizierung der Fachkräfte durch Interdisziplinarität und Internationalität gekennzeichnet. Mittels geeigneter Transfermechanismen, wie etwa Clusterinitiativen, gelingt die Unterstützung von Unternehmen bei der Durchführung ihrer Innovationsaktivitäten. Auch die Förderung des Bundes im Rahmen des LuFo Klima unterstützt die Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt beitragen.

Die Digitalisierung bietet Potenziale, die sowohl auf Ebene der Wertschöpfung genutzt werden können als auch bei der Simulation des Gesamtsystems Luftfahrt. Die einzelnen Wertschöpfungsstufen können mithilfe digitaler Planungs- und Entwicklungswerkzeuge stärker integriert werden mit dem Ziel, Effizienzsteigerungen zu realisieren. Digitale Zwillinge von Flugzeugen bieten während der Entwicklung und im Betrieb die Möglichkeit, verschiedene Systemkonfigurationen hinsichtlich ihrer Klimawirkungen zu simulieren und dabei auch der Komplexität des Gesamtsystems Rechnung zu tragen. Mit digitalen Zwillingen kann zudem geprüft werden, wie robust bzw. resilient Hard- und Softwarekomponenten unter wechselnden Bedingungen reagieren. Hierzu kann perspektivisch auch die Wechselwirkung mit digitalen Atmosphärenmodellen simuliert werden, um noch genauer zu ermitteln, wie klimaoptimierte Systeme und Flugrouten aussehen müssen.

Effizienzsteigerungen durch Verbesserungen bestehender Technologien können ebenfalls als Stärke des Standorts Deutschland angesehen werden. In der Vergangenheit konnte so beispielsweise der Kraftstoffverbrauch reduziert werden. Verbesserungen wie sie u.a. bei Turbofan-Triebwerken durch Wassereinspritzung angestrebt werden, werden auch durch Innovationen der deutschen Luftfahrtindustrie ermöglicht (Interviews Belitz/Berndes u. Donus).

Den Stärken stehen allerdings auch Schwächen gegenüber. So erweist sich die gegenwärtige Regulierung etwa im Bereich Zertifizierung/Zulassung, aber auch bei der Verpflichtung zur Kompensation als Nachteil, denn ein nationaler Alleingang bei der Verschärfung der Regulierung kann zu einer Benachteiligung einzelner Akteure und damit auch zu einer Wettbewerbsverzerrung bzw. zu einer Verlagerung klimaschädlicher Emissionen führen.

Weiterhin wurde zwar das Qualifikationsniveau der Fachkräfte als Stärke betont, allerdings zeichnet sich auch für die Luftfahrtindustrie ein Mangel an geeigneten



Fachkräften ab (Kap. 6.2.2). Damit dürfte die künftige Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit eingeschränkt werden, wenn nicht entsprechende Rekrutierungs- und Qualifizierungsmaßnahmen initiiert werden.

Pfadabhängigkeiten und unterschiedliche zeitliche Verläufe von Entwicklungszyklen sind weitere Schwächen. Zunächst einmal ist der Flugzeugentwurf durch inkrementelle Verbesserungen gekennzeichnet. Der Wechsel zu einem völlig neuen Design, wie es beispielsweise ein mit Wasserstoff angetriebenes Flugzeug erfordern würde, ist mit enormen Kosten verbunden. Es ist daher denkbar, dass die Entwicklung eines solchen Wasserstoffflugzeuges nur als internationale Kooperation durchführbar ist. Dadurch könnte allerdings zentrales Know-how abfließen, sodass das Erreichen bzw. Erhalten einer marktführenden Position gefährdet sein könnte. Zudem bestehen Pfadabhängigkeiten zwischen Technologien wie etwa den Triebwerken und Infrastrukturen zur Erzeugung und Bereitstellung von Treibstoffen. Daher spielt die Drop-in-Fähigkeit von Kraftstoffen eine wichtige Rolle als Zwischenschritt auf dem Weg zu einer klimaneutralen Gestaltung der Luftfahrt. Drop-in-Fähigkeit bedeutet, dass zum Teil existierende Infrastruktur und Technologien für die Herstellung, Bereitstellung und Verwendung von Kraftstoffen genutzt werden können. Eine Umstellung auf die direkte Nutzung von Wasserstoff wäre hingegen mit erheblichen Kosten verbunden. Schließlich können sich auch die verschiedenen zeitlichen Verläufe dieser Entwicklungen als Schwäche erweisen. Angesichts der Entwicklungs- und Adaptionszyklen einerseits und dem Ziel der Klimaneutralität andererseits ist fraglich, ob bis 2045 überhaupt in größerem Umfang klimaneutrale Kraftstoffe und Antriebskonzepte Bestandteil der weltweiten Flugzeugflotten sein werden.

Die langen Planungs- und Entwicklungszyklen führen dazu, dass neue Flugzeuge erst langfristig Bestandteil von Flotten sein werden.

Wenn es darum geht, Demonstratoren zu realisieren, in denen zum Teil neue Lösungen integriert sind und getestet werden können, so ist die gegenwärtige FuE-Förderung in Deutschland nicht auf derart aufwendige Vorhaben ausgelegt. Anders sieht dies beispielsweise in den USA aus, wo Demonstratoren wie etwa das Demonstratorprojekt X-66A von NASA und Boeing mit ca. 1,15 Mrd. US-Dollar im Rahmen einer groß angelegten Förderinitiative (O'Shea 2023) unterstützt werden. Um einzelne Technologien in Deutschland auf einen notwendigen Reifegrad zu bringen und anschließend zu skalieren, ist die nationale Förderung in ihrem bisherigen Umfang nicht ausreichend. Hinzu kommt, dass die für einen Testbetrieb eines Demonstrators notwendigen Zulassungen und Zertifizierungen aufgrund verteilter Zuständigkeiten in unterschiedlichen Zulassungsbehörden nur sehr aufwendig zu realisieren sind.

Eine Zertifizierung für neue Kraftstoffe wie SAF und Wasserstoff ist angesichts der Sicherheitsanforderungen (Kap. 6.2.1 u. 6.2.4) eine wichtige Voraussetzung für deren künftige Verwendung. Allerdings besteht gegenwärtig zum Teil Unklarheit bei den betroffenen Akteuren darüber, wie die Zuständigkeiten bei der Formulierung internationaler ASTM-Standards verteilt sind. Problematisch ist dahingehend, dass ggf.



durch fehlende Standards bereits verfügbare Lösungen nicht zertifiziert und somit auch nicht eingesetzt werden können.

Ebenfalls als Schwäche angesehen werden können die gegenwärtigen Kompensationsmechanismen, die zum einen bewirken, dass die Verursacher von klimaschädlichen Emissionen die Verantwortung für die Reduzierung weiterreichen. Zum anderen können klimaschädliche Effekte verlagert werden. Gegenüber einer Konkretisierung der Kompensationsmaßnahmen bestehen allerdings erhebliche Veränderungsresistenzen der betroffenen Akteure. Neben Kompensationsmaßnahmen setzen auch die aktuell etablierten Zertifikatshandelssysteme Fehlanreize, die dazu beitragen, dass die Verursacher von Emissionen nicht direkt zu einer Vermeidung bzw. Reduzierung verpflichtet sind.

Mit Blick auf das zukünftig erwartete Wachstum der Luftfahrt insbesondere in asiatischen Ländern besteht schließlich noch eine weitere Schwäche. Die in Deutschland und Europa angestrebten Transformationspfade können zwar dabei helfen, Emissionen der Luftfahrt zu vermeiden und zu reduzieren; dieser Effekt fällt allerdings gering aus im Vergleich zum Emissionsanstieg, der durch die Zunahme der Flugreisen in anderen Teilen der Welt verursacht wird. Ein international abgestimmtes Vorgehen ist also erforderlich, um klimafreundliche Technologien zu verbreiten.

Eine Verlagerung von Effekten sowie ein Wachstum der Luftfahrt insbesondere in asiatischen Ländern kann dazu führen, dass der Effekt klimafreundlicher Maßnahmen gering ausfällt und eine klimaneutrale Luftfahrt nicht erreicht wird.





7 Handlungsfelder

Die Luftfahrt hat, verglichen mit anderen Verkehrsträgern, einen geringen Anteil an den weltweiten THG-Emissionen (Kap. 2.2). Allerdings werden die klimaschädlichen Emissionen (ca. 3 bis 5 %) nur von einem kleinen Teil der Weltbevölkerung verursacht. Zudem haben sich die Emissionen in den letzten 20 Jahren etwa verdoppelt. Mit Blick auf das angenommene weltweite Wachstum der Luftfahrt sowie eine ähnlich ablaufende Entwicklung in Deutschland (Kap. 2.3) lässt sich schlussfolgern, dass auch der Anteil der Emissionen aus der Luftfahrt künftig weiter ansteigen wird. Angesichts der dargestellten Herausforderungen hinsichtlich der erforderlichen Mengen an SAF, der eingeschränkten Nutzbarkeit von Wasserstoff sowie hybridelektrischen Antrieben, verbunden mit dem zeitlichen Verzug, mit dem technische Lösungen zur Klimaneutralität beitragen können, bieten weitere Handlungsoptionen die Gelegenheit, bereits kurzfristig messbare Effekte zu erzielen. Eine vollständig klimaneutrale Luftfahrt lässt sich ohne eine Kompensation der Emissionen, eine Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre sowie eine Vermeidung von Flügen bzw. eine Verlagerung von Flügen auf andere Verkehrsträger nicht erreichen.

Allerdings lässt sich mithilfe der zuvor skizzierten Innovationen das Maß des Emissionsanstiegs begrenzen und so eine klimaverträglichere Luftfahrt gestalten. Bei der Umsetzung der möglichen Lösungsansätze kann dabei auf eine innovationsfähige Akteurslandschaft zurückgegriffen werden (Kap. 6.3). Dadurch kann die deutsche Luftfahrtindustrie aufgrund der vorhandenen Technologieführerschaft einer Vorreiterrolle bei der Entwicklung klimaneutraler Flugzeuge spielen.

Für die Gestaltung einer klimaverträglicheren Luftfahrt bestehen verschiedene Handlungsoptionen: zum einen solche, die sehr kurzfristig umgesetzt werden können und wirksam sind (Kap. 7.1), und zum anderen die, deren Wirkungen erst mittel- bis langfristig einen Beitrag zur klimaneutralen Luftfahrt liefern können (Kap. 7.2).

7.1 Kurzfristig realisierbare Maßnahmen mit großer Wirkung

Kurzfristig lassen sich klimaschädliche Effekte der Luftfahrt durch eine Reduktion des Aromatenanteils im Kerosin sowie eine Anpassung der Besteuerung verringern. Der Aromatenanteil bei Kerosin ist international festgelegt. Eine Reduzierung würde dazu beitragen, dass bei der Verbrennung weniger Rußpartikel und weniger Kondensstreifen entstehen. Allerdings müsste dafür zunächst die Zertifizierung derart angepasst werden, dass die Zulassung von Kerosin mit verringertem Aromatenanteil sowie aromatenfreien SAF möglich wird (Kap. 7.2).

Die Nutzung von SAF könnte auch durch Book-und-Claim-Konzepte unterstützt und die Wertschöpfungs- bzw. Lieferkette von SAF auf diese Weise nachhaltig gestaltet werden. Kern von Book-und-Claim-Konzepten sind Zertifikate für die Nutzung



von SAF, die Fluggesellschaften erwerben können, ohne dass SAF vor Ort getankt werden und komplexe Versorgungsinfrastrukturen realisiert werden müssen (aireg 2022, S.2 f.; IATA 2015, S.56 f.). Damit könnten Lieferketten regional und kosteneffizient, beispielsweise in Flughafennähe, gestaltet werden und SAF müssten nicht vom Ort der Herstellung zum Ort des Betankens transportiert werden (van Dyk/Saddler 2021, S.19). Zudem könnte der Zertifikatehandel dazu beitragen, dass Emissionseinsparungen auch weitergegeben werden können und eine erhöhte Nachfrage zu einer Ausweitung der Produktionskapazitäten führt (aireg 2022, S.2 ff.). Book-und-Claim-Konzepte können zudem dazu beitragen, dass die Einsparungen durch SAF auch im EU-EHS abgebildet werden können (Pechstein et al. 2020).

Kurzfristig realisierbare Maßnahmen wie eine Reduzierung des Aromatenanteils im Kerosin oder eine Erhebung einer Kerosinsteuer bieten Möglichkeiten, um zeitnah klimaschädliche Emissionen zu reduzieren.

Ein weiterer Hebel ist die Anpassung der Besteuerung der Luftfahrt durch Erhebung einer Kerosinsteuer. Da die Luftfahrt bereits auf vielfältigen Wegen besteuert wird, ist eine Kerosinsteuer bislang durch internationale Vereinbarungen ausgeschlossen (BDL 2019). Würde eine derartige Besteuerung dennoch beispielsweise in der EU oder gar nur in Deutschland eingeführt, besteht das Risiko, dass Fluggesellschaften außerhalb der besteuerten Bereiche tanken (Seifert 2023). Allerdings kann eine Besteuerung von Kerosin dazu beitragen, die Kosten, die durch klimaschädliche Emissionen entstehen, zu kompensieren sowie eine gerechtere Belastung unterschiedlicher Verkehrsträger zu gewährleisten (Egal et al. 2023).

Auch die zuvor dargestellten weiteren Innovationsbereiche (Kap. 5.4) bieten Hebel, die kurzfristig zu einer Reduzierung klimaschädlicher Emissionen beitragen können. Ein solcher Hebel ist die Optimierung von Flugrouten, um diejenigen Bereiche der Atmosphäre zu vermeiden, in denen besonders klimaschädliche Effekte auftreten können. In die Gestaltung klimaoptimaler Flugrouten muss das möglichst vollständige Wissen um das Auftreten und die Wirkung von Nicht-CO₂-Effekten einfließen (Kap. 6.2.3). Die Vermeidung von Nicht-CO₂-Effekten kann besonders effektiv Wirkung erzielen, da sie im Verhältnis zu den CO₂-Emissionen deutlich stärker wirken (Kap. 2.2). Allerdings ist die Optimierung von Flugrouten nicht nur eine Frage des Wissensstandes und der Nutzung digitaler Möglichkeiten zur Modellierung von Atmosphärenbereichen, sondern auch ein regulatorisches Problem. Insbesondere An- und Abflugrouten im Nahbereich von Flughäfen müssen zugelassen werden und dies setzt wiederum ausreichend verfügbare Personalkapazität voraus (Expertenworkshop 29.6.2023).

Durch die langjährige Förderung von Akteuren und Netzwerken sind leistungsfähige Innovationstreiber entstanden, die FuE-Vorhaben zur Entwicklung klimaneutraler Lösungen voranbringen. Kurzfristig können die bestehenden Netzwerke durch die Technologieförderung, insbesondere mit dem LuFo Klimaprogramm, gepflegt und ausgebaut werden.

Ein spezielles Augenmerk könnte auf das Segment der Privatflugzeuge gelegt werden, die insbesondere für Kurzstrecken genutzt werden. Hier zeigt sich in Deutsch-



land eine erhebliche Zunahme der durchgeführten Flüge, verbunden mit einem unverhältnismäßigen Anteil an klimaschädlichen Emissionen. Zwischen 2019 und 2022 war ein Plus von ca. 10% feststellbar, von rund 85.000 Flügen im Jahr 2019 auf ca. 94.000 Flüge im Jahr 2022 (Tagesschau 2023a). Rund 60% der Flüge (ca. 56.000) entfielen auf Kurzstrecken (< 300 km), ca. 10% (ca. 9.800) auf Langstrecken (> 1.000 km) (Tagesschau 2023a). Der Anteil von Privatflügen an den CO₂-Emissionen beträgt weltweit geschätzt ca. 0,04%. Allerdings sind die Emissionen pro Kopf natürlich deutlich höher und können in Abhängigkeit vom Flugzeugtyp sowie der Strecke zwischen 0,684 kg und 1,7 kg CO₂-Emissionen pro PKM betragen, während ein Passagierflugzeug durchschnittlich 0,128 kg CO₂-Emissionen/PKM verursacht (Transport & Environment 2021, S.12).

Privatflugzeuge werden nicht im Rahmen der EU-EHS berücksichtigt und nur sehr selten besteuert (Transport & Environment 2021). Da es sich allerdings in der Regel um Kleinflugzeuge handelt und überwiegend Kurzstrecken bedient werden, bietet sich dieses Segment an, um über eine Besteuerung bzw. den Emissionshandel und über die Einführung neuer Antriebskonzepte nachzudenken, wie etwa den batterieelektrischen Flugantrieb, um die klimaschädliche Wirkung zu reduzieren. Eine darüber hinausgehende Option könnte sogar ein Verbot von Kurzstreckenflügen sein, wie es beispielsweise in Frankreich umgesetzt wurde (BBC 2023).

7.2 Mittel- und langfristige Weichenstellungen

Gestaltungsoptionen, die voraussichtlich erst mittel- bis langfristig Wirkung erzielen werden, müssen dennoch kurzfristig auf den Weg gebracht werden. Gerade ange-



sichts der langfristigen Innovationszyklen sowie des Zeitbedarfs bei der Zertifizierung von Kraftstoffen und technischen Komponenten erscheint es notwendig, umgehend die Weichen für eine klimaneutrale Luftfahrt zu stellen.

In diese Kategorie kann die Anpassung von Standards und Normen sowie der Sicherheitszertifizierungen, insbesondere mit Fokus auf (bislang nicht zugelassene) aromatenfreie SAF, gefasst werden. Hier ist zu beachten, dass zum Teil international abgestimmte Standards und Zertifizierungen betroffen sind, sodass erst mittelfristig Änderungen zu erwarten sind. Eine Zulassung von aromatenfreien SAF könnte dazu beitragen, dass ein Impuls für die Verwendung sowie für die Ausweitung der Produktionskapazitäten entsteht. Auch eine Veränderung von Sicherheitsstandards, beispielsweise um den neuen Triebwerken und Rumpfdesigns elektrisch betriebener Flugzeuge zu entsprechen, ist erforderlich, um Prototypen testen sowie zur Marktreife bringen zu können. Auch hier ist die Änderung von Sicherheitsstandards mit Aufwand und Zeit verbunden (Adu-Gyamfi/Good 2022, S.11).

Mittelfristig können Standards und Zulassungsverfahren angepasst werden, um innovativen Lösungen den Raum zu geben, ihr Potenzial entfalten zu können.

Innerhalb eines verlässlichen regulatorischen Rahmens sollte allerdings auch Raum für Flexibilität bleiben, etwa bei der Quotenregelung für SAF. Anstelle einer fixen Quote bietet es sich an, einen situativ abhängigen³⁶ Einsatz von SAF zu ermöglichen, sodass verschiedene Arten von SAF dort nutzbar sind, wo sie mit einem Höchstmaß an Effizienz bereitgestellt werden können. Auch ließe sich eine Nutzung unter Berücksichtigung der Klimaeffekte flexibel gestalten, sodass für Routen mit besonders hohem Reduktionspotenzial³⁷ höhere Mengen an SAF genutzt werden könnten als auf anderen Routen. Zudem könnte eine flexibel gestaltete Quotenregelung von SAF auch dazu beitragen, Carbon-Leakage-Effekte zu reduzieren, indem SAF dort bereitgestellt werden, wo sie auch günstig produziert werden können. Weiterhin kann eine flexible Quote dazu führen, dass der Markthochlauf durch Erhöhung der Nachfrage stimuliert wird. Die Nachfrage kann sich erhöhen, wenn günstige Bezugsmöglichkeiten für SAF bestehen und als Reaktion darauf in einen weiteren Ausbau der Infrastruktur für SAF investiert wird.

Angesichts der zuvor aufgezeigten Interdependenzen zwischen Produktionsprozessen für unterschiedliche Varianten von SAF, möglicher Sektorkonkurrenzen bei der Produktion und Nutzung von Wasserstoff sowie der Herausforderung, Produktionskapazitäten von grünem Wasserstoff zu skalieren (Kap. 5.2.3), erscheint es sinnvoll, über eine Sektorkopplung nachzudenken. Dadurch ließen sich Investitionslasten zum Aufbau ausreichender Infrastrukturen gerechter verteilen. So könnte ein Beitrag zum Aufbau einer nationalen Wasserstoffinfrastruktur geleistet werden, die ausreichend Kapazitäten für den Bedarf des Luftfahrtsektors bietet.

36 Situative Abhängigkeiten wären beispielsweise dort gegeben wo SAF auf Algenbasis besonders wirtschaftlich und ökologisch hergestellt werden könnten.

37 Derartige Flugrouten können anhand der atmosphärischen Zusammensetzung, der Temperatur sowie der vorgesehenen Flughöhe und Reisegeschwindigkeit eines Flugzeuges ermittelt werden.



Mittelfristig bietet die Digitalisierung Potenziale, um die Luftfahrt sowie den Flugzeugentwurf und -betrieb effizienter zu gestalten (Kap. 6.3). Die Nutzung dieser Potenziale und der dafür erforderliche Aufbau digitaler Infrastrukturen, wie beispielsweise Datenzentren und Serverinfrastrukturen, ist allerdings mit Investitionskosten verbunden, die möglicherweise – zusätzlich zu den Investitionen in nachhaltige Technologien – nicht von allen Akteuren geleistet werden können. Eine entsprechende Förderung zum Ausbau digitaler Infrastrukturen in der Luftfahrt kann die betroffenen Produzenten und ihre Zulieferer dabei unterstützen, die Potenziale zu heben.

Bislang besteht eine geringe Bereitschaft der meisten Fluggäste, höhere Preise zu bezahlen, die durch Berücksichtigung negativer Effekte der Luftfahrt zustande kommen, oder bei der Verkehrsmittelwahl klimafreundliche Alternativen zu wählen (Kap. 6.2.1). Das kann u.a. daher rühren, dass bei der Reiseplanung klimafreundliche Alternativen nur über geringe Sichtbarkeit verfügen. „Klimafreundlich-Labels“ könnten zu einer verbesserten Informationslage und Transparenz im Planungs- und Entscheidungsprozess beitragen, wenn sich Flugreisen bzw. -routen im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln oder beim Vergleich unterschiedlicher Flugroutenoptionen als klimafreundlicher und emissionsärmer herausstellen sollten.

Es ist evident, dass es keine einzelnen technologischen Lösungen gibt, mit der eine klimaneutrale Luftfahrt erreicht werden kann (Kap. 6.1). Somit müssen parallel verschiedene Innovationspfade verfolgt werden. Angesichts der einerseits bestehenden Innovationszyklen und der andererseits vorgegebenen Zieljahre – 2045 für Deutschland bzw. 2050 für die EU – müssen Investitionen in FuE langfristig gesichert sein. Die parallele Entwicklung verschiedener Technologien mit unklarem Durchsetzungspotenzial erfordert erhebliche finanzielle Anstrengungen. Insofern ist zur Schaffung eines verlässlichen Investitions- und Innovationsumfeldes eine sorgfältige Abwägung der unterschiedlichen Alternativen durch die Politik notwendig.





8 Literatur

- ▶ Abbas, A.; de Vicente, J.; Valero, E. (2013): Aerodynamic technologies to improve aircraft performance. In: *Aerospace Science and Technology* 28(1), S.100–132
- ▶ Adu-Gyamfi, B.; Good, C. (2022): Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. In: *Transportation Engineering* 9, Art. 100134
- ▶ ADV (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen e. V.) (2023): Umfassende repräsentative Fluggastbefragung: Klarer Trend – Der Passagier wird jünger und Kurzreisen nehmen ab. <https://www.adv.aero/wp-content/uploads/2023/08/ADV-PM-10-2023-Umfassende-repr%C3%A4sentative-Fluggastbefragung-Klare-Trends.pdf> (3.4.2024)
- ▶ ADV (o.J.): Schwefeldioxid (SO₂). <https://www.adv.aero/randomizer/schwefeldioxid-so2/> (3.4.2024)
- ▶ Afonso, F.; Sohst, M.; Diogo, C.; Rodrigues, S.; Ferreira, A.; Ribeiro, I.; Marques, R.; Rego, F.; Sohoulí, A.; Portugal-Pereira, J.; Policarpo, H. et al. (2023): Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review. In: *Progress in Aerospace Sciences* 137, Art. 100878
- ▶ Airbus (2020): Airbus achieves world's first fully automatic refuelling contacts. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-04-airbus-achieves-worlds-first-fully-automatic-refuelling-contacts> (15.3.2024)
- ▶ Airbus (2023): Global Market Forecast 2023. <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2023-06/Airbus%20Global%20Market%20Forecast%202023-2042%20Presentation.pdf> (15.3.2024)
- ▶ Airbus (o.J.): Sustainable aviation fuels. <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel> (3.4.2024)
- ▶ Aireg (2023): Klimaschutz in der Luftfahrt: Quote allein reicht nicht. <https://aireg.de/klimaschutz-in-der-luftfahrt-quote-allein-reicht-nicht/> (18.3.2024)
- ▶ Aireg (Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e. V.) (2022): A Book and Claim Approach for SAF. aireg's perspective on basic design principles. <https://relaunch.aireg.de/wp-content/uploads/2023/08/220601-ABookandClaimApproachforSAF.pdf> (15.3.2024)
- ▶ Airliners.de (2021): Langstreckenflüge für Großteil der Luftfahrtemissionen verantwortlich. <https://www.airliners.de/eurocontrol-langstreckenfluegen-stossen-co2/59388> (15.3.2024)
- ▶ Airliners.de (2023): Airbus kritisiert US-Subventionspaket für Nachhaltigkeit. <https://www.airliners.de/airbus-kritisiert-us-subventionspaket-nachhaltigkeit/67925> (18.3.2024)
- ▶ Allekotte, M.; Bergk, F.; Biemann, K.; Deregowski, C.; Knörr, W.; Althaus, H.-J.; Sutter, D.; Bergmann, T. (2020): Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 156/2020, Dessau-Roßlau
- ▶ Anderson, B.; Mueller, D.; Hoard, S.; Sanders, C.; Rijkhoff, S. (2022): Social Science Applications in Sustainable Aviation Biofuels Research: Opportunities, Challenges, and Advancements. In: *Frontiers in Energy Research* 9, Art. 771849



- ▶ ASTM International (o.J.): Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. Stand 2.8.2022, <https://www.astm.org/d7566-21.html> (18.3.2024)
- ▶ ASTM International (o.J.a): Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. <https://www.astm.org/d1655-22a.html> (3.4.2024)
- ▶ ASTM International (o.J.b): Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. <https://www.astm.org/d7566-22.html> (3.4.2024)
- ▶ ATAG (Air Transport Action Group) (2021): Waypoint 2050. https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf (18.3.2024)
- ▶ Aviationsbenefits (o.J.): What is sustainable aviation fuel? <https://aviationbenefits.org/faqs/what-is-sustainable-aviation-fuel> (3.4.2024)
- ▶ Bardt, H.; Schaefer, T. (2023): CO₂-Preis steigert Kosten für die Industrie. Institut der Deutschen Wirtschaft, IW-Kurzbericht 66, [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2023/IW-Kurzbericht_2023-CO₂-Preis-Emissionshandel.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2023/IW-Kurzbericht_2023-CO2-Preis-Emissionshandel.pdf) (3.4.2024)
- ▶ Barke, A.; Bley, T.; Thies, C.; Weckenborg, C.; Spengler, T. (2022): Are Sustainable Aviation Fuels a Viable Option for Decarbonizing Air Transport in Europe? An Environmental and Economic Sustainability Assessment. In: Applied Sciences 12(2), Art. 597
- ▶ Batteiger, V.; DeBreuker, R.; Dedoussi, I.; Delfs, J.; Dinkelacker, F.; Elham, A.; Garcia, S.; Friedrichs, J.; Goertz, S.; Grewe, V.; Haije, W. et al. (2023): Accelerating the path towards carbon-free aviation. Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt; Technische Universität Braunschweig, https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Forschung/NFL/Accelerating_the_path_towards_carbon-free_aviation.pdf (3.4.2024)
- ▶ Batteiger, V.; Habersetzer, A. (2022): Synthetic jet fuels and the long journey to climate neutrality. Bauhaus Luftfahrt, <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=T3uMJXrlhJ4> (3.4.2024)
- ▶ Bauen, A.; Bitossi, N.; German, L.; Harris, A.; Leow, K. (2020): Sustainable Aviation Fuels. Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. In: Johnson Matthey Technology Review 64(3), S.263–278
- ▶ Bauhaus Luftfahrt (o.J.): Passagierakzeptanz von hybrid-elektrischen Flugzeugen in Deutschland. <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/de/forschungsbereiche/urban-regional-air-mobility/passagierakzeptanz-von-hybrid-elektrischen-flugzeugen-in-deutschland> (3.4.2024)
- ▶ BBC (British Broadcasting Corporation) (2023): France bans short-haul flights to cut carbon emissions. <https://www.bbc.com/news/world-europe-65687665> (3.4.2024)
- ▶ BDL (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V.) (2016): Wie sicher ist Fliegen? <https://www.bdl.aero/de/publikation/wie-sicher-ist-fliegen/> (3.4.2024)
- ▶ BDL(2019):CO₂-undKerosinsteuer?WarumderKlimaschutzimLuftverkehrandersgerregelt wird. [https://www.bdl.aero/de/publikation/co₂-und-kerosinsteuer-warum-der-klimaschutz-im-luftverkehr-anders-geregelt-wird/](https://www.bdl.aero/de/publikation/co2-und-kerosinsteuer-warum-der-klimaschutz-im-luftverkehr-anders-geregelt-wird/) (3.4.2024)



- ▶ BDL (2021): Masterplan – Klimaschutz im Luftverkehr. Maßnahmen für einen CO₂-neutralen Luftverkehr. <https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2020/12/Masterplan-Klimaschutz-im-Luftverkehr-1.pdf> (3.4.2024)
- ▶ BDL (2022a): Klimaschutz im Luftverkehr. https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2019/08/20221028_Analyse-Klimaschutz-im-Luftverkehr.pdf (3.4.2024)
- ▶ BDL (2022b): USA fördern alternative Flugkraftstoffe. <https://www.klimaschutzportal.aero/meldung/usa-foerdern-alternative-flugkraftstoffe/> (3.4.2024)
- ▶ BDLI (2023): Branchendaten der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie für 2022. <https://www.bdli.de/meldungen/branchendaten-der-deutschen-luft-und-raumfahrtindustrie-fuer-2022> (3.4.2024)
- ▶ BDLI (Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V.) (2021): Annual Report 2021. Branchendaten der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie. Berlin
- ▶ Berneiser, J.; Senkpiel, C.; Kustermann, M.; Götz, S. (2020): Flugverhalten in Deutschland und Europa. Ergebnisse einer repräsentativen Befragung der deutschen Bevölkerung. Fraunhofer ISE, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/Ergebnisse_Flugstudie.pdf (3.4.2024)
- ▶ Beyers, B. (2023): Drei bis vier Mal teurer als fossiles Kerosin. Interview Harald Dialer. Global Energy Solutions e. V., <https://global-energy-solutions.org/drei-bis-vier-mal-teurer-als-fossiles-kerosin/#> (3.4.2024)
- ▶ Bieler, C.; Sutter, D. (2019): Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland. Straßen-, Schienen-, Luft- und Binnenschiffverkehr 2017. INFRAS, <https://www.allianz-proschiene.de/wp-content/uploads/2019/08/190826-infras-studie-externe-kostenverkehr.pdf> (3.4.2024)
- ▶ Blanshard, A.; McCurdy, M.; Reid-Kay, A.; Chokhani, S. (2021): Fueling Net Zero. How the aviation industry can deploy sufficient sustainable aviation fuel to meet climate ambitions. ICF International Inc., https://aviationbenefits.org/media/167495/fueling-net-zero_september-2021.pdf (3.4.2024)
- ▶ BMDV (Bundesministerium für Digitales und Verkehr) (2022): Klimaneutrale Luftfahrt. <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/klimaneutrale-luftfahrt.html> (3.4.2024)
- ▶ BMVg (Bundesministerium der Verteidigung) (2022): Nachhaltigkeitsbericht 2022 des Bundesministeriums der Verteidigung und der Bundeswehr. Berichtszeitraum 2020-2021. <https://www.bmvg.de/resource/blob/5561086/9aac6bb5bcd64e90a0552a3705878987/download-nachhaltigkeitsbericht-2022-data.pdf> (3.4.2024)
- ▶ BMWK (2023): Durchbruch für ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien in der EU. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/06/20230616-neue-eu-richtlinie-fuer-erneuerbare-energien-angenommen.html> (25.10.2023)
- ▶ Boeing (2022a): Commercial Market Outlook 2022 – 2041. https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/market/assets/downloads/CMO-2022-Report_FINAL_v01.pdf (3.4.2024). S. 24



- ▶ Boeing (2022b): World Air Cargo Forecast 2022–2041. https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/market/assets/downloads/Boeing_World_Air_Cargo_Forecast_2022.pdf (3.4.2024)
- ▶ Bopst, J.; Herbener, R.; Hölzer-Schopohl, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Weiß, J. (2019a): Umweltschonender Luftverkehr. lokal – national – international. Umweltbundesamt, UBA-Texte 130/2019, Dessau-Roßlau
- ▶ Bopst, J.; Hölzer-Schopohl, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Schmied, M.; Weiß, J. (2019b): Wohin geht die Reise? Luftverkehr der Zukunft: umwelt- und klimaschonend, treibhausgasneutral, lärmarm. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- ▶ Brandt, K.; Camenzind, D.; Zhu, J.; Latta, G.; Gao, J.; Wolcott, M. (2022): Methodology for quantifying the impact of repurposing existing manufacturing facilities: case study using pulp and paper facilities for sustainable aviation fuel production. In: *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 16(5), S.1227–1239
- ▶ Brownlow, J. (2023): Carbon capture, direct air capture, and SAF. World Aviation Festival, <https://worldaviationfestival.com/blog/airlines/carbon-capture-direct-air-capture-and-saf/> (3.4.2024)
- ▶ Bullerdiel, N.; Quante, G.; Bube, S.; Neuling, U. (2022): Non Drop-In Kraftstoffe im Luftverkehr – Ein gesamtsystemischer Vergleich von Nutzungs- und Einsatzmöglichkeiten. aireg e. V., https://www.researchgate.net/publication/358149982_Non-Drop-In-Kraftstoffe-im-Luftverkehr-_Ein-gesamtsystemischer-Vergleich-von-Nutzungs-_und-Einsatzmöglichkeiten (3.4.2024)
- ▶ Bundesregierung (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (3.4.2024)
- ▶ 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 (3.4.2024)
- ▶ Bundesregierung (2022): Klimaneutrale Luftfahrt. Gemeinsames Papier der Bundesregierung. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/220621-Klimaneutrale-Luftfahrt-Juni-22-Vfin-Anlage-BR.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (3.4.2024)
- ▶ Bundesregierung (2023): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=9 (3.4.2024)
- ▶ Burstedde, A.; Koneberg, F. (2022): Fachkräftemangel im Flugverkehr. Institut der Deutschen Wirtschaft, IW-Kurzbericht 52/2022, https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht_2022-Fachkr%C3%A4ftemangel-Luftfahrt.pdf (3.4.2024)
- ▶ CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative) (o. J.): Frequently Asked Questions: CAAFI. <https://www.caafi.org/resources/faq.html> (3.4.2024)
- ▶ Cabrera, E.; de Sousa, J. (2022): Use of Sustainable Fuels in Aviation – A Review. In: *Energies* 15(7), Art. 2440



- ▶ Calvin, K.; Cowie, A.; Berndes, G.; Arneth, A.; Cherubini, F.; Portugal-Pereira, J.; Grassi, G.; House, J.; Johnson, F.; Popp, A.; Rounsevell, M. et al. (2021): Bioenergy for climate change mitigation: Scale and sustainability. In: GCB Bioenergy 13(9), S.1346–1371
- ▶ Chester, M.; Horvath, A. (2009): Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. In: Environmental Research Letters 4(2), Art. 024008
- ▶ Clean Sky 2; FCH 2 (Fuel Cells and Hydrogen 2) (2020): Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Luxemburg
- ▶ ClimatePartner (2024): Was bedeutet Net Zero wirklich? <https://www.climatepartner.com/de/climate-action-insights/was-bedeutet-net-zero-wirklich> (3.4.2024)
- ▶ Creemers, W.; Slingerland, R. (2007): Impact of Intermediate Stops on Long-Range Jet-Transport Design. In: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) (Hg.): Meeting Paper. 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO), <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2007-7849> (3.4.2024)
- ▶ Cronin, D.; Subramaniam, S.; Brady, C.; Cooper, A.; Yang, Z.; Heyne, J.; Drennan, C.; Ramasamy, K.; Thorson, M. (2022): Sustainable Aviation Fuel from Hydrothermal Liquefaction of Wet Wastes. In: Energies 15(4), Art. 1306
- ▶ Dahlmann, K.; Matthes, S.; Niklass, M.; Plohr, M.; Scheelhaase, J.; Wozny, F. (2023): Klimawirkung des Luftverkehrs. Wissenschaftlicher Kenntnisstand, Entwicklungen und Maßnahmen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- ▶ DEHSt (Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt) (2022): Treibhausgasemissionen 2021. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2021), Berlin
- ▶ Del Monte, D.; Cruz, P.; Dufour, J. (2022): SAF production from cameline oil hydro-treatment: A techno-economic assessment of alternative process configurations. In: Fuel 324, Part B, Art. 124602
- ▶ Destatis (2023): 78 % mehr Reisen ins Ausland im Jahr 2022 als im Vorjahr, aber 13 % weniger als vor Corona. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/07/PD23_279_45.html (3.4.2024)
- ▶ DGLR (Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Lilienthal-Oberth e. V.) (2023): Rolls-Royce hat den UltraFan-Technologiedemonstrator erfolgreich in Derby, Großbritannien, getestet. [https://www.dglr.de/?id=68&tx_ttnews\[tt_news\]=479](https://www.dglr.de/?id=68&tx_ttnews[tt_news]=479) (3.4.2024)
- ▶ DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (2021): Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt. Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal. <https://www.dlr.de/de/medien/publikationen/broschueren/2021/auf-dem-weg-zu-einer-emissionsfreien-luftfahrt/@@download/file> (3.4.2024)
- ▶ DLR (2022): Personenverkehr in Deutschland: Verkehrsmittel im Vergleich. <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/daten-und-fakten/personenverkehr-in-deutschland-verkehrsmittel-im-vergleich> (3.4.2024)



- ▶ DLR (2023): 45 Millionen für Erprobung von Wasserstoff in der Luftfahrt. <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/02/luft-und-raumfahrtkoordinatorin-uebergibt-foerderbescheid-fuer-fliegendes-wasserstofflabor> (3.4.2024)
- ▶ DLR (o.J.a): CO₂-Fußabdruck und Klimawirkung von Kondensstreifen senken. <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/emissionsfreies-fliegen/co2-fussabdruck-und-klimawirkung-von-kondensstreifen-senken> (3.4.2024)
- ▶ DLR (o.J.b): Das Luftfahrtforschungsprogramm des Bundes LuFo Klima. <https://www.dlr.de/de/pt-lf/foerderprogramme/bundesebene/das-luftfahrtforschungsprogramm-des-bundes-lufo-klima> (3.4.2024)
- ▶ Egal, J.; Mauroschat, R.; Dardenne, J. (2023): Aviation Tax Cap. How much revenues are governments losing out on due to poor aviation taxation? Transport & Environment, https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/07/tax_gap_report_july_2023.pdf (3.4.2024)
- ▶ EK (Europäische Kommission) (2020): Commission Staff Working Document. Accompanying the document Report from the Commission to the European Parliament and the Council Updated analysis of the non-CO₂ climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). SWD(2020) 277 final, PART 3/3, Brüssel
- ▶ EK (2021a): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG in Bezug auf den Beitrag der Luftfahrt zum gesamtwirtschaftlichen Emissionsreduktionsziel der Union und die angemessene Umsetzung eines globalen marktbasierten Mechanismus. COM(2021) 552 final, Brüssel,
- ▶ EK (2021b): Vorschlag für eine Verordnung der Europäischen Parlaments und des Rates zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr. COM(2021) 561 final, Brüssel
- ▶ EK (2022): European Green Deal: new rules agreed on applying the EU emissions trading system in the aviation sector. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7609 (3.4.2024)
- ▶ EK (o.J.): Nachhaltige Flugzeugtreibstoffe – ReFuelEU Aviation. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Nachhaltige-Flugzeugtreibstoffe-ReFuelEU-Aviation_de (3.4.2024)
- ▶ EP (Europäisches Parlament) (2019): CO₂-Emissionen des Luft- und Schiffsverkehrs: Zahlen und Fakten (Infografik). 14.6.2022, <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20191129STO67756/co2-emissionen-des-luft-und-schiffsverkehrs-zahlen-und-fakten-infografik> (3.4.2024)
- ▶ EP (2021): Carbon Leakage: Unternehmen daran hindern, Emissionsvorschriften zu umgehen, 3.7.2023, <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20210303STO99110/carbon-leakage-unternehmen-daran-hindern-emissionsvorschriften-zu-umgehen> (3.4.2024)
- ▶ EREA (Association of European Research Establishments in Aeronautics) (2020): EREA Future of Aviation – The scenarios. Amsterdam



- ▶ Eurocontrol (2022): Eurocontrol Aviation Outlook 2050. Main Report. https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/13448 (3.4.2024)
- ▶ Eurocontrol (2023): The challenge of long-haul flight decarbonisation: When can cutting-edge energies and technologies make a difference? Think Paper 21, https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/14263 (3.4.2024)
- ▶ FAA (Federal Aviation Administration) (o.J.): Next Generation Air Transportation System (NextGen). <https://www.faa.gov/nextgen> (3.4.2024)
- ▶ Faber, J.; Király, J.; Lee, D.; Owen, B.; O'Leary, A. (2022): Potential for reducing aviation non-CO₂ emissions through cleaner jet fuel. CE Delft, [https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/CE_Delft_210410_Potential_reducing_aviation_non-CO₂_emissions_cleaner_jet_fuel_FINAL.pdf](https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/CE_Delft_210410_Potential_reducing_aviation_non-CO2_emissions_cleaner_jet_fuel_FINAL.pdf) (3.4.2024)
- ▶ FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2023): Flugtickets bleiben wegen knapper Kapazitäten teuer. 3.7.2023, <https://www.faz.net/aktuell/finanzen/meine-finanzen/geld-ausgeben/flugtickets-bleiben-wegen-knapper-kapazitaeten-teuer-19006747.html> (3.4.2024)
- ▶ Fleming, G.; de Lépinay, I.; Schaufele, R. (2022): Environmental Trends in Aviation to 2050. In: ICAO (2022), S.24–31
- ▶ Flux Power (2019): Types Of Electric Airport Ground Support Equipment. <https://www.fluxpower.com/blog/types-of-electric-airport-ground-support-equipment> (3.4.2024)
- ▶ Friedmann, A.; Belz, C. (2022): Luftverkehr in Deutschland – Mobilitätsbericht 2021. DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, <https://www.dfs.de/homepage/de/medien/publikationen/luftverkehr-in-deutschland-mobilitaetsbericht-2021.pdf?cid=gvb#:~:text=1.669.139%20Fl%C3%BCge%20nach%20Instrumentenflugregeln%20wurden%202021%20im%20deutschen%20Luftraum,auf%20dem%20Niveau%20von%201991> (3.4.2024)
- ▶ Fücks, R.; von Randow, M.; Thum, V. (2023): Roadmap Klimaneutrales Fliegen (2.0). Zentrum Liberale Moderne, https://libmod.de/wp-content/uploads/LibMod_Roadmap_klimaneutralesFliegen.pdf (3.4.2024)
- ▶ Gelhausen, M.; Berster, P.; Wilken, D. (2021): Post-COVID-19 Scenarios of Global Airline Traffic until 2040 That Reflect Airport Capacity Constraints and Mitigation Strategies. In: Aerospace 8(10), Art. 300
- ▶ Gipson, L. (2023): About Sustainable Flight Demonstrator Project. National Aeronautics and Space Administration, <https://www.nasa.gov/directorates/armd/integrated-aviation-systems-program/armd-iasp-sfd/about-sustainable-flight-demonstrator-project/> (3.4.2024)
- ▶ Gössling, S.; Humpe, A. (2020): The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. In: Global Environmental Change 65, Art. 102194
- ▶ Graichen, V. (2021): Luftverkehr im EU-ETS und CORSIA im „Fit for 55“ – Paket. Vorschlag der EU-Kommission vom 14.07.2021. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- ▶ Graver, B. (2022): Polishing my crystal ball: Airline traffic in 2050. International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/global-aviation-airline-traffic-jan22/> (3.4.2024)



- ▶ Graver, B.; Zhang, K.; Rutherford, D. (2019): CO2 emissions from commercial aviation, 2018. International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf (3.4.2024)
- ▶ Graver, B.; Zheng, X.; Rutherford, D.; Mukhopadhyaya, J.; Pronk, E. (2022): Vision 2050. Aligning Aviation with the Paris Agreement. International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/Aviation-2050-Report-A4-v6.pdf> (3.4.2024)
- ▶ Hamburg Aviation; iit (Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE-IT) (2019): Die Luftfahrt-Branche in der Metropolregion Hamburg. https://www.iit-berlin.de/iit-docs/34c10ec753924613a471cf221ae1f3b7_die-luftfahrtbranche-in-der-metropolregion-hamburg.pdf (3.4.2024)
- ▶ Heib, S.; Hildebrand, J. (2022): AP 6 – Akzeptanzforschung: SynFuels-Akzeptanz – Bedingungen und Einflussfaktoren. IZES gGmbH, https://elib.dlr.de/187256/1/Impulsvortrag_AP6_DLR_IZES_2022-06-27.pdf (3.4.2024)
- ▶ IATA (International Air Transport Association) (2015): IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap. Genf
- ▶ IATA (2018): Prognostizierte Anzahl der weltweiten Flugpassagiere in den Jahren 2017 bis 2037. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/374860/umfrage/flugverkehr-entwicklung-passagiere-weltweit/> (25.10.2023)
- ▶ IATA (2023a): Air Passenger Market Analysis. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-market-analysis-april-2023/> (3.4.2024)
- ▶ IATA (2023b): IATA Annual Safety Report – 2022. Executive Summary and Safety Overview. <https://www.iata.org/contentassets/a8e49941e8824a058fee3f5ae0c005d9/safety-report-executive-and-safety-overview.pdf> (3.4.2024)
- ▶ IATA (2023c): Number of flights performed by the global airline industry from 2004 to 2023, with forecasts until 2024. Statista, <https://www.statista.com/statistics/564769/airline-industry-number-of-flights> (23.4.2024)
- ▶ IATA (2023d): Worldwide air freight traffic from 2004 to 2021, with an estimate for 2022 and 2023. Statista, <https://www.statista.com/statistics/564668/worldwide-air-cargo-traffic/> (25.10.2023)
- ▶ IATA (2024): Anzahl der Flüge in der weltweiten Luftfahrt von 2014 bis 2023. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/411620/umfrage/anzahl-der-weltweiten-fluege/> (23.4.2024)
- ▶ IATA (o.J.): Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification. Fact Sheet 2, <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf> (3.4.2024)
- ▶ ICAO (International Civil Aviation Organization) (2022): Innovation for a green transition. 2022 Environmental Report. <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO%20ENV%20Report%202022%20F4.pdf> (3.4.2024)



- ▶ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Lee, H.; Romero, J.) https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_Longer_Report.pdf (3.4.2024)
- ▶ ISG (Institut für Sozialforschung und Gesellschaftspolitik) (o.J.): Evaluation des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo-VI). <https://www.isg-institut.de/evaluation-des-sechsten-zivilen-luftfahrtforschungsprogramms-lufo-vi/> (3.4.2024)
- ▶ Kim, H.; Teter, J. (o.J.): Aviation. Tracking report. International Energy Agency, 11.7.2023, <https://www.iea.org/reports/aviation> (3.4.2024)
- ▶ Kirchgeßner, K. (2022): Klimafreundlich fliegen: Woran die Forschung tüftelt. Helmholtz-Klima-Initiative, <https://www.helmholtz-klima.de/aktuelles/klimafreundlich-fliegen> (3.4.2024)
- ▶ Klöwer, M.; Allen, M.; Lee, D.; Proud, S.; Gallagher, L.; Skowron, A. (2021): Quantifying aviation's contribution to global warming. In: Environmental Research Letters 16(10), Art. 104027
- ▶ Königs, L. (2021): CO₂-Kompensation – was bringen eigentlich die Programme der Airlines? TRAVELBOOK, <https://www.travelbook.de/fliegen/airlines/airlines-flug-kompensieren> (3.4.2024)
- ▶ Kramer, S.; Andac, G.; Heyne, J.; Ellsworth, J.; Herzig, P.; Lewis, K. (2022): Perspectives on Fully Synthesized Sustainable Aviation Fuels: Direction and Opportunities. In: Frontiers in Energy Research 9, Art. 782823
- ▶ Lausberg, C. (2022): Ziel klimaneutral fliegen: Lufthansa und Airbus wollen CO₂ aus der Luft filtern. Frankfurtflyer.de, <https://frankfurtflyer.de/ziel-klimaneutral-fliegen-lufthansa-und-airbus-wollen-co2-aus-der-luft-filtern/> (3.4.2024)
- ▶ Le Feuvre, P. (2019): Are aviation biofuels ready for take off? International Energy Agency, <https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off> (3.4.2024)
- ▶ Lee, D.; Fahey, D.; Skowron, A.; Allen, M.; Burkhardt, U.; Chen, Q.; Doherty, S.; Freeman, S.; Forster, P.; Fuglestvedt, J.; Gettelman, A. et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: Atmospheric Environment 244, Art. 117834
- ▶ Leipold, A.; Aptsiauri, G.; Ayazkhani, A.; Bauder, U.; Becker, R.-G.; Berghof, R.; Claßen, A.; Dadashi, A.; Dahlmann, K.; Dzikus, N.; Flüthmann, N. et al. (2021b): Development Pathways for Aviation up to 2050. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., https://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/aktuelles/DEPA2050_StudyReport.pdf (3.4.2024)
- ▶ Lukic, M.; Giangrande, P.; Hebalá, A.; Nuzzo, S.; Galea, M. (2019): Review, Challenges, and Future Developments of Electric Taxiing Systems. In: IEEE Transactions on Transportation Electrification 5(4), S.1441–1457
- ▶ Machatschke, M. (2023): Warum ein neuer Flugsommer des Schreckens droht.. In: manager magazin 7, S.60–65



- ▶ Michelmann, J.; Schmalz, U.; Becker, A.; Stroh, F.; Behnke, S.; Hornung, M. (2023): Influence of COVID-19 on air travel – A scenario study toward future trusted aviation. In: Journal of air transport management 106, Art. 102325
- ▶ Miller, J.; Hafenstine, G.; Nguyen, H.; Vardon, D. (2022): Kinetics and Reactor Design Principles of Volatile Fatty Acid Ketonization for Sustainable Aviation Fuel Production. In: Industrial & Engineering Chemistry Research 61(8), S.2997–3010
- ▶ Mithal, S.; Rutherford, D. (2023): ICAO's 2050 net-zero CO2 goal for international aviation. International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/global-aviation-ICAO-net-zero-goal-jan23.pdf> (3.4.2024)
- ▶ Möller, P. (2023): Güterverkehr-Statistik weltweit: Deutschland, Europa und international. DHL Freight Connections, <https://dhl-freight-connections.com/de/trends/gueterverkehr-statistik-weltweit-deutschland-europa-und-international/> (3.4.2024)
- ▶ Nangia, R. (2006): Operations and aircraft design towards greener civil aviation using air-to-air refuelling. In: The Aeronautical Journal 110(1113), S.705–721
- ▶ Nationaler Wasserstoffrat (2021): Wasserstoff für die Luftfahrt in Deutschland. Stellungnahme, https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-04-16_NWR-Stellungnahme_Luftverkehr.pdf (3.4.2024)
- ▶ Niklaß, M. (2019): Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftfahrt. Dissertation, https://elib.dlr.de/126415/1/DLR-FB-2019-06_DoktorarbeitMalteNikla%C3%9F_final.pdf (3.4.2024)
- ▶ Oakleaf, B.; Cary, S.; Meeker, D.; Arent, D.; Farrell, J.; Day, M.; McCormick, R.; Abdullah, Z.; Young, S.; Cochran, J.; Gearhart, C. (2022): A Roadmap Toward a Sustainable Aviation Ecosystem. National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83060.pdf> (3.4.2024)
- ▶ Offset Guide (Carbon Offseit Guide) (o.J.): Total Climate Impacts from Aviation. <https://www.offsetguide.org/understanding-carbon-offsets/air-travel-climate/climate-impacts-from-aviation/total-climate-impact-from-aviation/> (3.4.2024)
- ▶ Öko-Institut (2020a): Factsheet 1: Klimaschädliche Wirkungen des Luftverkehrs. https://fliegen-und-klima.de/downloads/Factsheet_1_klimaschaedliche_Wirkungen.pdf (3.4.2024)
- ▶ Öko-Institut (2020b): Factsheet 5: Die Zukunftsperspektiven. https://fliegen-und-klima.de/downloads/Factsheet_5_Zukunft.pdf (3.4.2024)
- ▶ Öko-Institut (o.J.a): Eine Frage der Qualität. <https://fliegen-und-klima.de/eine-frage-der-qualitaet.html> (3.4.2024)
- ▶ Öko-Institut (o.J.b): Ist Kompensation sinnvoll? <https://fliegen-und-klima.de/ist-kompensation-sinnvoll.html> (3.4.2024)
- ▶ Öko-Institut (o.J.c): Verkehrsmittel im Vergleich. <https://fliegen-und-klima.de/verkehrsmittel-im-vergleich.html> (3.4.2024)
- ▶ Öko-Institut (o.J.d): Wie funktioniert Kompensation? <https://fliegen-und-klima.de/wie-funktioniert-kompensation.html> (3.4.2024)



- ▶ Öko-Institut (o.J.e): Wie wirken Flugemissionen? <https://fliegen-und-klima.de/wie-wirken-flugemissionen.html> (25.10.2023)
- ▶ Oliver Wyman (2022): Projected size of the global aircraft fleet due to coronavirus outbreak from 2020 to 2032. Statista, <https://www.statista.com/statistics/282237/aircraft-fleet-size/> (25.10.2023)
- ▶ O’Shea, C. (2023): Next Generation Experimental Aircraft Becomes NASA’s Newest X-Plane. NASA, 12.6.2023, <https://www.nasa.gov/press-release/next-generation-experimental-aircraft-becomes-nasa-s-newest-x-plane> (3.4.2024)
- ▶ Pax Global Media (2023): Radar shows record-breaking number of flights in one day. <https://news.paxeditions.com/news/airline/radar-shows-record-breaking-number-flights-one-day> (3.4.2024)
- ▶ Pechstein, J.; Bullerdiek, N.; Kaltschmitt, M. (2020): A „book and Claim“-Approach to account for sustainable aviation fuels in the EU-ETS – Development of a basic concept. In: Energy Policy 136, Art. 111014
- ▶ Pilz, D. (2023): Flug-Kompensation: Fliegen mit reinem Gewissen? FairPlane, <https://www.fairplane.de/ratgeber/flug-kompensation/> (3.4.2024)
- ▶ Pinheiro Melo, S.; Barke, A.; Cerdas, F.; Thies, C.; Mennenga, M.; Spengler, T.; Herrmann, C. (2020): Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies – Challenges, Methods and Tools. In: Sustainability 12, Art. 5663
- ▶ Qazi, U. (2022): Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications; Challenges and Expected Opportunities. In: Energies 15(13), Art. 4741
- ▶ Ranasinghe, K.; Guan, K.; Gardi, A.; Sabatini, R. (2019): Review of advanced low-emission technologies for sustainable aviation. In: Energy 188, Art. 115945
- ▶ Rat der EU (Rat der Europäischen Union) (2023): Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors: Einigung zwischen Rat und Parlament. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/04/25/council-and-parliament-agree-to-decarbonise-the-aviation-sector/> (3.4.2024)
- ▶ Rat der EU (o.J.): Infografik – „Fit für 55“: für mehr umweltfreundliche Kraftstoffe im Flug- und Seeverkehr, 12.10.2023, <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-refueled-and-fueled/> (3.4.2024)
- ▶ Rennert, K.; Errickson, F.; Prest, B.; Rennels, L.; Newell, R.; Pizer, W.; Kingdon, C.; Wingenroth, J.; Cooke, R.; Parthum, B.; Smith, D. et al. (2022): Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. In: Nature 610(7933), S.687–692
- ▶ Scheelhaase, J.; Grimme, W.; Maertens, S. (2023): Neue Klimaschutzregeln für den europäischen Luftverkehr: Chancen und Risiken. In: Wirtschaftsdienst 103(2), S.118–122
- ▶ Scholz, D. (2021): Umweltschutz in der Luftfahrt – Hintergründe und Argumente zur aktuellen Diskussion. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, https://reposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/11261/1/AERO_RR_UmweltschutzLuftfahrt_2021-07-03.pdf (3.4.2024)



- ▶ Schulz, J. (2020): Kosten unterscheiden sich je nach Anbieter. CO₂-Kompensation bei Flügen. Deutschlandfunk, <https://www.deutschlandfunk.de/co2-kompensation-bei-fluegen-kosten-unterscheiden-sich-je-100.html> (3.4.2024)
- ▶ Schwan, B. (2023): Neues aus dem Flugzeugbau: NASA will Fliegen radikal spritsparender machen. Heise online, <https://www.heise.de/hintergrund/Neues-aus-dem-Flugzeugbau-NASA-will-Fliegen-radikal-spritsparender-machen-9202594.html> (3.4.2024)
- ▶ Seifert, A. (2023): Wieso Kerosin und Flugreisen bisher nicht versteuert werden. Mitteldeutscher Rundfunk, <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/wirtschaft/fliegen-klimaschutz-steuer-kerosin-tickets-100.html> (3.4.2024)
- ▶ SESAR (Single European Sky ATM Research Joint Undertaking) (2020): European ATM master plan – Digitalising Europe’s aviation infrastructure – Executive View – 2020 edition. Luxemburg
- ▶ Shahriar, M.; Khanal, A. (2022): The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). In: Fuel 325, Art. 124905
- ▶ Siemons, A.; Schneider, L.; Wissner, N.; Keimeyer, F.; Gores, S.; Graichen, J. (2021): Möglichkeiten zur Regulierung der Klimawirkungen des Luftverkehrs. Öko-Institut e. V., <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Moeglichkeiten-zur-Regulierung-der-Klimawirkungen-des-Luftverkehrs.pdf> (3.4.2024)
- ▶ SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (3.4.2024)
- ▶ Statista (2022): Weltweiter Luftfrachtverkehr. <https://de.statista.com/statistik/studie/id/85941/dokument/weltweiter-luftfrachtverkehr/> (3.4.2024)
- ▶ Statista (2023): Luftverkehrsbranche Deutschland. <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6562/dokument/luftverkehrsbranche-deutschland-statista-dossier/> (3.4.2024)
- ▶ Statista (o.J.): Anzahl der beförderten Personen im Luftverkehr in den Jahren 2004 bis 2022 in Deutschland. 02/2023, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12552/umfrage/befoerderte-personen-im-luftverkehr/> (25.10.2023)
- ▶ TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2022): Auf dem Weg zu einem klimaneutralen Luftverkehr – nachhaltige Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte. (Abel, S.) TAB-Themenkurzprofil 53, Berlin
- ▶ Tagesschau (2023a): Millionen Tonnen Treibhausgase durch Privatjets. <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr/privatjets-treibhausgase-klima-101.html> (3.4.2024)
- ▶ Tagesschau (2023b): Flugtickets bleiben wohl teuer. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/flugreise-ticketpreise-luftverkehr-100.html> (3.4.2024)
- ▶ Teoh, L.; Khoo, H. (2016): Green air transport system: An overview of issues, strategies and challenges. In: KSCE Journal of Civil Engineering 20(3), S.1040–1052
- ▶ Thomas, P.; Bhandari, U.; Bullock, S.; Richardson, T.; Du Bois, J. (2014): Advances in air to air refuelling. In: Progress in Aerospace Sciences 71, S.14–35



- ▶ Topsoe (o.J.): The Outlook for SAF. <https://www.topsoe.com/sustainable-aviation-fuel/saf-outlook> (3.4.2024)
- ▶ Transport & Environment (2021): Private jets: can the super rich supercharge zero-emission aviation? https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/05/202209_private_jets_FINAL_with_addendum.pdf (3.4.2024)
- ▶ Tyagi, A.; Crossley, W. (2009): Investigating Long-Range Aircraft Staging for Environment, Economic and Travel Time Impacts. In: American Institute of Aeronautics and Astronautics: AIAA Meeting Paper. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2009-6956> (3.4.2024)
- ▶ UBA (Umweltbundesamt) (o.J.): Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split. Stand 13.2.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#guterverkehr>(3.4.2024)
- ▶ United States (2021): 2021 Aviation Climate Action Plan. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf (3.4.2024)
- ▶ Van Dyk, S.; Saddler, J. (2021): Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges. IEA Bioenergy, <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf> (3.4.2024)
- ▶ VDR (Verband Deutsches Reisemanagement e. V.) (2022): VDR-Geschäftsanalyse 2022. <https://www.vdr-service.de/fileadmin/services-leistungen/fachmedien/geschaeftsreiseanalyse/VDR-Geschaeftsreiseanalyse-2022.pdf> (3.4.2024)
- ▶ Wagener, L. (2019): Was ist eigentlich CO₂? Definition, Entstehung & Einfluss aufs Klima. co2online, <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/klimawandel/was-ist-co2/> (3.4.2024)
- ▶ Wagner, E.; Jacques, D.; Blake, W.; Pachter, M. (2002): Flight Test Results of Close Formation Flight for Fuel Savings. American Institute of Aeronautics and Astronautics, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2002-4490> (3.4.2024)
- ▶ Walker, A. (2020): Guest Editorial: Johnson Matthey Technology Review Special Edition on Clean Mobility. In: Johnson Matthey Technology Review 64(3), S.234–235
- ▶ Wangler, L.; Kerlen, C.; Bräuninger, M.; Meyer, S.; Teuber, M.-O. (2019): Evaluation des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo). Zusammenfassung zentraler Ergebnisse und Handlungsempfehlungen. Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin
- ▶ Wikipedia (o.J.): Flight length. https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_length (3.4.2024)
- ▶ Wolfe, P.; Yim, S.; Lee, G.; Ashok, A.; Barrett, S.; Waitz, I. (2014): Near-airport distribution of the environmental costs of aviation. In: Transport Policy 34, S.102–108
- ▶ Wolters, S.; Schaller, S.; Götz, M. (2018): Freiwillige CO₂-Kompensation durch Klimaschutzprojekte. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- ▶ WEF (World Economic Forum) (2022): Clean Skies for Tomorrow: Delivering on the Global Power-to-Liquid Ambition. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/aerospace%20and%20defense/our%20insights/clean%20skies%20>



for%20tomorrow%20delivering%20on%20the%20global%20power%20to%20liquid%20ambition/clean-skies-for-tomorrow-delivering-on-the-global-power-to-liquid-ambition.pdf (3.4.2024)

- ▶ Worldbank (The World Bank) (o.J.a): Air transport, passengers carried. <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR> (3.4.2024)
- ▶ Worldbank (The World Bank) (o.J.b): Air transport, registered carrier departures worldwide. <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.DPRT> (3.4.2024)
- ▶ YouGov (2022): Die Preise für Flugtickets sind in den vergangenen Monaten gestiegen. Wie wahrscheinlich ist es, dass Sie in den kommenden 12 Monaten aufgrund der Preisanstiege bei den Flugtickets das Fliegen einschränken werden? <https://yougov.de/topics/society/survey-results/daily/2022/10/12/c3d89/1/> (3.4.2024)
- ▶ YouGov (2023): Haben Sie schon einmal bei Antritt einer Flugreise Flugscham empfunden, also Scham in Bezug auf die Benutzung von Verkehrsflugzeugen? <https://yougov.de/topics/society/survey-results/daily/2023/04/04/88ad9/2> (3.4.2024)



9 Anhang

9.1 Interviewpartner/innen, beteiligte Expert/innen

Name	Organisation
Anonym	MTU Aero Engines AG
Thomas Belitz	Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.
Stefan Berndes	Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.
Martin Cames	Senior Researcher Energie & Klimaschutz, Öko-Institut e.V.
Marc Fette	Composite Technology Center/CTC GmbH/An AIRBUS Company
Jens Friedrichs	TU Braunschweig, Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen
Roland Gerhards	Hamburg Aviation/ZAL
Wolfgang Grimme	DLR-Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr
Andreas Gundel	bavAIRia e.V.
Peter Kasten	stellvertretender Bereichsleiter Ressourcen & Mobilität, Öko-Institut e.V.
Björn Nagel	DLR-Institut für Systemarchitekturen
Bastian Rauch	DLR-Institut für Verbrennungstechnik
Patrick Schmidt	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
Robert Schreiber	Deutsche Aircraft GmbH
Dieter Scholz	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Peter Schwarz	bavAIRia e.V.

Die Interviews fanden im Zeitraum März bis Mai 2023 statt, die Workshops mit Expert/innen am 21. und 29. Juni 2023.

9.2 Abbildungen

Abb. 1	Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems	11
Abb. 2	Optionen zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt	28
Abb. 3	Forschungsförderung von Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt – Förderung von Einzelvorhaben des BMWK	40
Abb. 4	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte der Teilbranche 303 Luft- und Raumfahrzeugbau	41
Abb. 5	Clusterinitiativen in der Luftfahrt in Deutschland	43
Abb. 6	Weltweite Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens	46
Abb. 7	Indirekte Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens (weltweit)	47
Abb. 8	Relation der deutschen Beteiligung an den Aktivitäten im Vergleich zur Gesamtmenge	48
Abb. 9	Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten	49
Abb. 10	Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten	50



Abb. 11	Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten deutscher Akteure	50
Abb. 12	Top-10-Akteure in Deutschland	51
Abb. 13	Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten mit deutscher Beteiligung	52
Abb. 14	Synthese – Technologieschwerpunkte für die beiden Bereiche Kraftstoffe und Antriebskonzepte für einen klimafreundlicheren Luftverkehr	52
Abb. 15	Winglet-Design	63
Abb. 16	Blended-Wing-Body-Design	64
Abb. 17	Technologiepfade und Beiträge zur Klimaneutralität	71

9.3 Tabellen

Tab. 1	Klimawirkungen der Luftfahrt	20
Tab. 2	Vorgesehene Maßnahmen für einen Beitrag der Luftfahrt zum Klimaschutz	29
Tab. 3	Nachhaltige Flugzeugkraftstoffe, ihre jeweiligen Ausgangsrohstoffe und Beimischungsverhältnisse	55
Tab. 4	Überblick über Zeithorizonte und Technologieverfügbarkeit in der Luftfahrt	70
Tab. 5	Sicherheit und weitere Parameter verschiedener Energieträger (qualitativer Vergleich)	77

9.4 Abkürzungen

ATM	Air Traffic Management
BETO	U.S. Department of Energy Bioenergy Technologies Office
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMWK	Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz
CO ₂	Kohlendioxid
CORDIS	Community Research and Development Information Service
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme
E-Fuels	Elektrotreibstoffe
EK	Europäische Kommission
EU-EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
EWK	Europäischen Wirtschaftsraums
FTK	Frachttonnenkilometern
FuE	Forschung und Entwicklung
H ₂ /H ₂ O	Wasserstoff/Wasser
HC-HEFA	Hydroprocessed Hydrocarbons
HEFA	wasserstoffbehandelte Estern und Fettsäuren
HEP	hybridelektrisch



HH-SPK	Hydroprocessed Hydrocarbons
ICAO	International Civil Aviation Organization
ITZ	Innovations- und Technologiezentrum Wasserstoff des BMDV
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramm
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
PKM	Personenkilometer
PtL	Power to Liquid
SAF	Sustainable Aviation Fuels
SFC	spezifischer Kraftstoffverbrauch
SWOT	Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse
THG	Treibhausgas
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VFA	Volatile Fatty Acids
WET	Water-enhanced Turbofan-Triebwerke

