



## Anlagenkonvolut

---

zum Wortprotokoll der 67. Sitzung  
am 20. März 2023

**zu TOP 1a**

- 20(18)217                    Tätigkeitsbericht 2021/2022 des TAB  
20(18)218                    Tätigkeitsbericht 2023 des TAB

**zu TOP 1b**

- 20(18)215                    TA-Arbeitsbericht

**zu TOP 1c**

- 20(18) 216                    TA-Kurzstudie Nr. 6 (Langfassung)  
20(18)216a                    TA-Kurzstudie Nr. 6 (Kurzfassung)



Deutscher Bundestag  
Ausschuss für Bildung, Forschung  
und Technikfolgenabschätzung  
Ausschussdrucksache  
20(18)215  
05.03.2024

BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG  
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Pauline Riousset  
Christoph Kehl

## Komplexe Systeme – Nutzen oder Last?

TA-Vorstudie





Pauline Riousset  
Christoph Kehl

## **Komplexe Systeme – Nutzen oder Last?**

TA-Vorstudie

**TAB-Arbeitsbericht Nr. 208**



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](mailto:buero@tab-beim-bundestag.de)  
Web: [www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de)

2024

Umschlagbild: xx

ISSN-Internet: 2364-2602

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	5
1 Einleitung	7
2 Was sind komplexe Systeme?	9
3 Zwischen Ordnung und Unordnung: systemische Risiken und Resilienz	17
4 Fallbeispiel Energiesystem	25
5 Schlussfolgerungen und mögliche Vertiefungsthemen	33
6 Literatur	37
7 Abbildungen	45

^>  
v

---

## Zusammenfassung

Komplexität ist vielen Systemen inhärent – von lebenden Organismen bis hin zum globalen Finanzsystem. Komplexe Systeme haben gemeinsam, dass sie nicht vollständig verstanden oder beschrieben werden können. Das liegt an ihren strukturellen und dynamischen Eigenschaften, die von nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen gekennzeichnet sind und unter Umständen zu unerwartetem Systemverhalten führen können. Politisch relevant sind insbesondere soziotechnische Systeme, die für das Funktionieren der Gesellschaft von kritischer Bedeutung sind – sogenannte kritische Infrastruktursysteme. Kritische Infrastrukturen bestehen in der Regel aus vielen Komponenten, die in einer Netzstruktur zusammenwirken. Aufgrund ihrer Komplexität und engen Vernetzung können relativ kleine Störungen zu Kaskadeneffekten bis hin zu Systemversagen führen. Systemische Risiken, die ein weitreichendes Systemversagen auslösen können, lassen sich am ehesten über die Analyse soziotechnischer Trends untersuchen. In dieser Vorstudie wird dargelegt, warum das Energiesystem für eine Analyse im Rahmen eines umfassenden TA-Projekts besonders geeignet erscheint. Darüber hinaus werden Themenbereiche aufgezeigt, die sich für eine Vertiefung anbieten. Dazu gehören die Analyse systemischer Risiken durch Sonnenstürme, der Einsatz künstlicher Intelligenz, die Rohstoff- und Lieferantenabhängigkeiten, die sich aus einem zunehmend komplexen Energiesystem ergeben können, sowie die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit kritischer Energieinfrastrukturen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen.

^>  
v

---

## 1 Einleitung

Komplexe Systeme bilden das Rückgrat moderner Industriegesellschaften. Dazu gehören etwa Energie-, Kommunikations-, Logistik- und Produktions- sowie Frühwarnsysteme. Das Funktionieren derartiger Systeme hängt vom Zusammenspiel verschiedener Elemente unterschiedlicher Art ab und ist entsprechend potenziell störungsanfällig. Die zahlreichen Wechselwirkungen und Rückkopplungen machen es schwer, das Verhalten eines solchen Systems vorherzusagen. Schon kleine Störungen können zu weitreichenden, ggf. unerwünschten Veränderungen im Systemzustand führen. Durch die fortschreitende Digitalisierung haben der Vernetzungsgrad sowie die Komplexität kritischer Infrastrukturen in den letzten Jahren zugenommen und dürften in Zukunft noch weiter zunehmen. Deshalb stellt sich die Frage, wie sich die wachsende Komplexität auf Vulnerabilität und Resilienz der Infrastrukturen auswirkt.

Das TAB wurde vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung mit der Durchführung dieser TA-Vorstudie beauftragt. Ziel ist es, Systeme und Teilsysteme zu identifizieren, die einen Komplexitätsgrad erreicht haben, bei welchem bei einer Störung oder einem Ausfall von einer Gefahrenlage für die Gesellschaft ausgegangen werden kann und für die eine vertiefte Untersuchung als TA-Projekt geeignet erscheint. Mit der vorliegenden Analyse werden die Ergebnisse dieser Voruntersuchung zusammengefasst: Sie basiert auf einer Literaturübersicht sowie der Befragung von Expert/innen. Ergänzend wurde die durch künstliche Intelligenz (KI) unterstützte Medienmonitoringplattform »RS-Lynx« einbezogen, um zu untersuchen, welche der Risiken komplexer Systeme in der Öffentlichkeit besonders diskutiert werden und welche Themen dabei im Vordergrund stehen.

Die Vorstudie ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden komplexe Systeme und ihre Merkmale charakterisiert und es wird erläutert, warum Infrauktursysteme als komplexe Systeme gesellschaftlich besonders im Fokus stehen. In Kapitel 3 werden weitere zentrale Begriffe wie systemisches Risiko und Resilienz eingeführt, die für die Analyse komplexer Systeme und ihrer Ausfallrisiken von Bedeutung sind. Mit dem Energiesystem wird in Kapitel 4 ein Infrauktursystem diskutiert, das – so das Ergebnis dieser Vorstudie – für eine Analyse im Rahmen eines umfassenden TA-Projekts besonders geeignet erscheint. Die möglichen inhaltlichen Schwerpunkte eines solchen Projekts sowie das jeweilige Vorgehen werden zusammen mit weiteren Schlussfolgerungen im abschließenden Kapitel 5 dargestellt.

^>  
v

---

## 2 Was sind komplexe Systeme?

In verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, wie der Physik, der Biologie, der Kybernetik sowie der Ökologie, wird der Begriff der Komplexität schon lange verwendet. Er beschreibt, grob zusammengefasst, funktionale Strukturen bzw. Systeme, die aus einer heterogenen Vielfalt von Komponenten bestehen, die miteinander und mit der Umwelt in nichtlinearer Weise interagieren und zu einem kohärent funktionierenden Gesamtsystem beitragen. So ist ein lebender Organismus ein komplexes System, weil er unzählige Bestandteile umfasst, die in kaum überschaubaren Beziehungen zueinanderstehen, und beständig Energie, Stoffe und Informationen mit der Umwelt austauschen. Gleichzeitig handelt es sich bei Lebewesen um hochgradig geordnete Strukturen, die durch Umsetzung genetischer Codes entstehen (Goldenfeld/Kadanoff 1999, S. 87).

Komplexität ist vielen Systemen inhärent. Das globale Finanzsystem, internationale Beziehungen oder Verkehrsmuster können und wurden als komplex beschrieben (Page 2015, S. 23). Auch wenn die Betrachtung menschlichen Verhaltens bislang eher selten Gegenstand von Forschungsvorhaben zu Komplexität war, ist Komplexität auch in der Soziologie ein begrifflicher Ankerpunkt zur Erklärung gesellschaftlicher Phänomene und Ordnungen (Hauff 2022; Lutz-Bachmann 2022; Page 2015, S. 23). Im Zuge der Globalisierung werden zunehmend auch Beziehungsmuster zwischen Gesellschaften aus der Komplexitätsperspektive soziologisch erforscht. So beschreiben Centeno et al. (2015), wie gesellschaftliche Interaktionen auf globaler Ebene systemisch zusammenwirken, und zeigen anhand von vier Beispielen (kontinuierlicher Fluss von Waren sowie von Geld, Aufrechterhaltung einer globalen Infrastruktur und Interaktion menschlicher Gesellschaften mit dem Klimasystem), wie daraus globale systemische Risiken entstehen.

Komplexe Systeme haben gemeinsam, dass sie über unzählige Zustände und Verhaltensmöglichkeiten verfügen können, die unter Umständen schwer oder gar nicht vorhersagbar sind (Johansen/Rausand 2014, S. 276). Dennoch ist das Systemverhalten in der Regel nicht chaotisch. Wie die Kybernetik gezeigt hat, beruhen komplexe Systeme auf den Prinzipien der Selbstorganisation und Selbstregulierung, wodurch sich ein Gleichgewicht einstellt (Müggenburg 2019). Diese systemische Ordnung beruht allerdings auf nichtlinearen internen Regelungsprozessen: Das Verhalten einzelner Komponenten wird durch das Verhalten anderer Einzelkomponenten, aber auch durch die Makroegenschaften des Systems und durch externe Einflüsse bestimmt, die wiederum durch das Verhalten einzelner Komponenten beeinflusst werden (Page 2015, S. 27). In der Konsequenz können sich die Effekte eines Ereignisses durch positive Rückkopplungsschleifen im System verstärken oder durch negative Rückkopplungsschleifen abschwächen. Dieses dynamische Systemverhalten ist für Anpas-



sungsprozesse an veränderte Bedingungen erforderlich, kann aber zu Chaos und im Extremfall zum Systemzusammenbruch führen.

Ein Unterschied besteht zwischen Komplexität und Kompliziertheit (Dekker et al. 2011, S. 942): Komplizierte Systeme (wie z. B. ein Flugzeug) sind zwar schwer zu verstehen, aber im Prinzip vollständig beschreibbar. Auf komplexe Systeme trifft das hingegen nicht zu, da sie aufgrund ihrer strukturellen und dynamischen Eigenschaften nicht vollständig versteh- oder beschreibbar sind (Abb. 2.1). Sind Menschen mit einem System konfrontiert, dessen Komponenten und Interaktionen sie kennen, dessen Verhalten sich allerdings nicht gänzlich verstehen und vorhersehen lässt, kann Komplexität bei Ihnen ein Gefühl der Unbehaglichkeit hervorrufen (Mitchell 2009).

Abb. 2.1 Unterschied zwischen komplexen und komplizierten Systemen

	kompliziertes System	äußerst komplexes System
Vielfalt/Vielfalt	<p>kompliziertes System</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>› viele Elemente und Beziehungen</li> <li>› wenige Verhaltensmöglichkeiten</li> <li>› stabile Wirkungsverläufe</li> </ul>	<p>äußerst komplexes System</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>› Vielzahl von unterschiedlichen Elementen mit vielfältigen Beziehungen</li> <li>› hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten</li> <li>› veränderliche Wirkungsverläufe</li> </ul>
	einfaches System	relativ komplexes System
gering	<p>einfaches System</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>› wenige Elemente und Beziehungen</li> <li>› wenige Verhaltensmöglichkeiten</li> <li>› stabile Wirkungsverläufe</li> </ul>	<p>relativ komplexes System</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>› wenige Elemente und Beziehungen</li> <li>› hohe Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten</li> <li>› veränderliche Wirkungsverläufe</li> </ul>
	Veränderung/Eigendynamik	hoch
hoch	gering	hoch

Quelle: nach Grösser 2015

### Kritische Infrastruktursysteme als komplexe Systeme

Aus der Perspektive der Technikfolgenabschätzung sind vor allem komplexe soziotechnische Systeme interessant. Darunter werden Systeme verstanden, die aus technischen und sozialen Elementen (z. B. Menschen und Organisationsprinzipien) bestehen (Johansen/Rausand 2014, S. 273).

Zu den soziotechnischen Systemen, die einen hohen Anteil technischer Komponenten und einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen, gehören kritische Infrastrukturen (Strauß/Bettin 2023, S. 13). Seit 2023 verpflichtet die Richtlinie

(EU) 2022/2557<sup>1</sup> EU-Mitgliedstaaten dazu, kritische Einrichtungen zu identifizieren und deren Widerstandsfähigkeit gegenüber Bedrohungen wie Naturgefahren, Terroranschlägen oder Sabotage zu stärken. In Deutschland werden kritische Infrastrukturen wie folgt definiert (BBK o. J.c): »Kritische Infrastrukturen (KRITIS) sind Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsgenässen, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden«. 2011 entschieden Bund und Länder, kritische Infrastrukturen in neun Sektoren zu unterteilen, die 2021 mit der Novellierung des BSI-Gesetzes (BSIG)<sup>2</sup> um einen zehnten Sektor (die Siedlungsabfallwirtschaft) ergänzt wurden (Abb. 2.2).

Abb. 2.2 Kritische Infrastrukturen



1 gemäß BSIG

2 gemäß Bund-Länder-AG

Quelle: BBK o.J.a

1 Richtlinie (EU) 2022/2557 über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/114/EG

2 BSI-Gesetz vom 14.8.2009, zuletzt geändert am 23.6.2021



Für jeden Sektor wurden kritische Dienstleistungen identifiziert. Mit dem BSIG sowie der BSI-Kritisverordnung (BSI-KritisV)<sup>3</sup> sind kritische Infrastrukturen in Deutschland umfassend reguliert. In der BSI-KritisV werden kritische Dienstleistungen definiert sowie Einrichtungen, Anlagen oder Teile, deren IT-Infrastruktur es besonders zu schützen gilt (BSI o.J.). Die Einteilung der Infrastrukturen in Sektoren und Branchen wird allerdings stetig evaluiert und angepasst, um den politischen Diskurs widerzuspiegeln (BBK o.J.a). Das von der aktuellen Bundesregierung geplante KRITIS-Dachgesetz soll einen übergreifenden institutionellen Rahmen für kritische Infrastrukturen schaffen, Mindeststandards für deren physischen Schutz festlegen und wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Infrastrukturen berücksichtigen (BMI 2023).

Während kritische Infrastrukturen nach dem BSIG vor allem (größere) Infrastrukturen ab einem festgelegten Schwellenwert bezeichnen, werden Infrastrukturen in der Forschung zu Technik und Wissenschaft breiter gefasst, um die Interaktionen zwischen Technik und Mensch, die Rolle digitaler Infrastrukturen sowie die wachsenden Vernetzungen und Abhängigkeiten zwischen Systemen und Dienstleistungen zu berücksichtigen. So beschreiben Strauß und Bettin (2023, S. 13) kritische Infrastrukturen aus Perspektive der TA als »Systeme, Systemteile und Anwendungen, die für eine funktionsfähige Grundversorgung [...] relevant sind«. Kritische Infrastrukturen bestehen in der Regel aus vielen Komponenten, die in einer Netzstruktur zusammenwirken. Meistens sind die Komponenten physisch und funktional heterogen und in einer Hierarchie von Subsystemen organisiert, die in ihrer Gesamtheit zur Funktion des Gesamtsystems beitragen (Zio 2016, S. 138). Dessen Hauptfunktion besteht darin, die für das jeweilige Infrauktursystem konstitutiven Versorgungsleistungen in einer verlässlichen und möglichst effizienten Weise der Gesellschaft zur Verfügung zu stellen. Dafür sind unzählige, miteinander verschachtelte Prozesse erforderlich, die Endnutzer/innen meist verborgen bleiben und den konstanten Austausch von Finanzmitteln, Stoffen, Energie, Information etc. innerhalb des Systems und mit seiner Umgebung organisieren. Wie alle komplexen Systeme sind auch kritische Infrastrukturen nicht trennscharf gegenüber ihrer Umwelt abgrenzbar (und somit nicht vollständig beschreibbar), da sie in ständigen Wechselwirkungen mit ihren Umfeldern stehen.

Um eine funktionsfähige Grundversorgung zu gewährleisten, ist es nicht mehr ausreichend, jeden einzelnen kritischen Sektor in den Blick zu nehmen, sondern es sind auch die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den kritischen Sektoren zu berücksichtigen. Durch die zunehmende Verflechtung aller kritischer Infrastrukturen entsteht eine Megainfrastruktur, die als System von Systemen bezeichnet werden kann. Wesentlicher Treiber dafür ist die Digitalisierung, die praktisch alle gesellschaftlichen Bereiche und Infrastrukturen umfasst, aber grundlegend auf Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

---

3 BSI-Kritisverordnung vom 22.4.2016, zuletzt geändert am 29.11.2023

und die Versorgung mit Energie angewiesen ist (Strauß/Bettin 2023). Auf diese Weise werden verschiedene, ursprünglich unabhängige, Systeme eng miteinander vernetzt. Erst durch das Zusammenwirken dieser Systeme entstehen die gewünschten Funktionen (Nielsen et al. 2015).<sup>4</sup> So beruht die Versorgung mit gesundheitlichen Dienstleistungen beispielsweise auf den Interaktionen zwischen Energie-, Verkehr- und IKT-Infrastruktur mit dem Gesundheitssektor (Mentges et al. 2023, S. 7). Entstehen neue Verbindungen zwischen kritischen Dienstleistungen (z. B. zwischen Stromsektor und Mobilität oder zwischen dem Abfall- und dem Energiesektor) können relativ kleine Störungen durch die Komplexität und enge Kopplung schnell zu komplexen multiinfrastrukturellen Krisen führen (Perrow 1984). Denn wenn kritische Systeme miteinander verbunden sind, werden die kritischen Elemente eines jeden Systems zu kritischen Elementen aller Systeme, da die Möglichkeit besteht, dass der Ausfall eines Teils des Systems sich auf die anderen Systeme auswirkt (Egan 2007, S. 7).

Da es heutzutage kaum noch möglich ist, kritische Infrastruktursysteme voneinander zu entkoppeln, erstreckt sich die Governance kritischer Infrastrukturen über verschiedene, oft fragmentierte Politikbereiche sowie institutionell unverbundene Versorgungs(teil)bereiche (Monstadt/Schmidt 2019, S. 2360 ff.). Die Klärung von Verantwortung und Verantwortlichkeiten stellt für Systeme, in denen Handlungen innerhalb eines Teilsystems Auswirkungen auf andere Teilsysteme haben, eine zentrale Herausforderung dar.

---

### **Komplexitätsmerkmale kritischer Infrastruktursysteme**

Die Komplexität kritischer Infrastruktursysteme zeigt sich sowohl in struktureller als auch in dynamischer Hinsicht. Beide Komplexitätsdimensionen sind für das Verständnis der Systeme relevant (zum Folgenden Centeno et al. 2015, S. 71 f.; Johansen/Rausand 2014, S. 276 ff.; Zio 2016).

#### **Strukturelle Komplexität**

Die strukturelle Komplexität ergibt sich im Wesentlichen aus der inneren Struktur eines Systems. In struktureller Hinsicht umfassen komplexe Systeme zum einen eine Vielzahl *heterogener Einzelkomponenten* über verschiedene Technologiedomänen hinweg. Beispielsweise besteht das Stromnetz aus elektrischen Komponenten (Maschinen und Kabelleitungen), aber auch aus IKT-Komponenten. Auch die *Vielfalt der beteiligten Akteure* und ihr Autonomiegrad im System tragen zur strukturellen Komplexität eines soziotechnischen Infrastruktursystems bei (Johansen/Rausand 2014, S. 284). So hängt z. B. die Stabilität des Energiesystems nicht nur von den Netzbetreibern ab, sondern zunehmend auch von diversen anderen Akteuren, die dezentral Strom in das Netz ein- und ausspeisen

---

4 DIN EN ISO 22300:2018: Sicherheit und Sesilienz – Vokabular



(z. B. Privatpersonen, die über Photovoltaikanlagen Strom produzieren). Auch Gerätehersteller und Betreiber von Kommunikationsnetzen sind Teil des komplexen Akteursnetzes im Energiesektor (Leopoldina et al. 2021, S. 39). Zum anderen hängt die strukturelle Komplexität vom Grad und Ausmaß der (wechselseitigen) *Abhängigkeiten* der Einzelkomponenten voneinander ab. Je strukturell komplexer ein System ist, desto stärker sind dessen Komponenten miteinander, aber auch mit den Komponenten benachbarter Systeme verbunden. So besteht das Stromsystem u. a. aus vielfältigen verteilten, jedoch miteinander vernetzten Komponenten, wie z. B. unterschiedlichen Energiequellen, Umwandlungstechnologien und Speichergeräten (Zio 2016, S. 139). Wechselseitige Abhängigkeiten können bei der Erbringung kritischer Dienstleistungen auch auf der Ebene von Nationalstaaten bestehen, beispielsweise bei der Versorgung mit Strom oder Wärme (Assemblée Nationale 2022, S. 43).

### **Dynamische Komplexität**

Die dynamische Komplexität manifestiert sich im Systemverhalten, das sich in Reaktion auf interne Veränderungen bzw. äußere Einwirkungen ergibt. Dynamisch-komplexe Infrastruktursysteme reagieren oft in unerwarteter Weise auf externe Einflüsse. Das heißt, die Wechselwirkungen der Teilsysteme sind nicht linear, das Verhalten des Systems folgt keinen einfachen Ursache-Wirkungs-Beziehungen, sondern ist durch Verzögerungen sowie Kaskaden- und Rückkopplungseffekte geprägt (Grösser 2015). Strukturelle und dynamische Komplexität hängen eng zusammen, da komplexes Verhalten sich u. a. aus den vielfältigen Abhängigkeiten und Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten des jeweiligen Infrastruktursystems ergibt (Dekker et al. 2011, S. 941). Typische Merkmale dynamisch-komplexer Infrastruktursysteme sind Selbstorganisation und Emergenz:

- *Selbstorganisation* heißt, dass ein System über die Fähigkeit verfügt, sich an äußere Einflüsse anzupassen, indem es seine innere Struktur spontan zu neuen kohärenten Mustern organisiert, ohne dass dafür eine steuernde Instanz oder eine externe Steuerung erforderlich sind.
- *Emergenz* bedeutet, dass sich durch die Wechselwirkungen zwischen den Elementen eines Systems – etwa durch Prozesse der Selbstorganisation – auf der höheren Systemebene neue Muster oder Verhaltensweisen herausbilden können. Beispielsweise haben Stromnetze in der Vergangenheit emergentes Verhalten gezeigt, indem lokale Ausfälle unerwartete Kaskadeneffekte verursacht und zu transnationalen, branchenübergreifenden Effekten geführt haben (Zio 2016, S. 139).

Die Einflussfaktoren, die bei Infrastruktursystemen ein unvorhersehbares (dynamisch-komplexes) Systemverhalten auslösen können, sind vielfältig. Dazu



gehören Naturgefahren (z. B. Extremwetter), gezielte Angriffe (z. B. Cyberattacken), zunehmende Zahl an Nutzer/innen oder Veränderungen im Nutzerverhalten (Zio 2016, S. 139 f.).

---

## Fazit

Kritische Infrastruktursysteme sind hochkomplex und gehören aufgrund ihrer Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen zu den bedeutendsten soziotechnischen Systemen. Ihre strukturelle und dynamische Komplexität kann zu emergentem, also unvorhersehbarem Verhalten führen. Um mögliche Störungen vorherzusehen und die Systeme darauf vorzubereiten, ist es essenziell, ihre Komplexität besser zu verstehen. Dazu gehört insbesondere eine Charakterisierung der Heterogenität der Einzelkomponenten und ihres Zusammenspiels, der Vielfalt beteiligter Akteure sowie von Abhängigkeiten und Interdependenzen, außerdem der Einflussfaktoren, die auf das System einwirken.

^>  
v

---

### 3 Zwischen Ordnung und Unordnung: systemische Risiken und Resilienz

Kritische Infrastrukturen stellen Dienstleistungen bereit, die für moderne Gesellschaften essenziell sind. Auch wenn die Prozesse und Strukturen, die das Bereitstellen dieser Dienstleistungen sicherstellen, kaum überschaubar und sehr variabel sind, ist es unerlässlich, dass sie zuverlässig und störungsarm funktionieren. Wie sich die zunehmende Komplexität dieser Systeme auf ihre Stabilität und Funktionsfähigkeit auswirkt, ist deshalb eine entscheidende Frage. Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist derjenige der Vulnerabilität, der wörtlich übersetzt Verletzlichkeit oder Verwundbarkeit bedeutet. Generell lässt sich von der Vulnerabilität eines Systems sprechen, wenn es anfällig gegenüber internen oder externen Störereignissen ist und diese zu einer problematischen Zustandsänderung im System führen, welche dessen Stabilität und Funktionsfähigkeit gefährden (Climate Service Center Germany o.J.; Strauß/Bettin 2023, S. 13 f.). Zu diesen Störereignissen gehören schleichende Entwicklungen, wie die Abnutzung interner Komponenten, Veränderungen im Nutzerverhalten oder den Umweltbedingungen, aber auch disruptive Störereignisse, die von innen (z. B. Ausfall einzelner Komponenten) oder auch außen (z. B. Cyberangriff) kommen können.

Der Zusammenhang zwischen Komplexität und Vulnerabilität ist nicht eindeutig. Auf der einen Seite können komplexe Organisationsstrukturen, die sich auf eine hohe Zahl interagierender Komponenten stützen, besonders anfällig für Störungen sein, da es unmöglich ist, diese Interaktionen wirksam zu überwachen oder zu kontrollieren. Auf der anderen Seite kann jedoch auch gelten: Je mehr und je unterschiedlicher die Komponenten sind und je komplexer deren Wechselwirkungen, desto mehr Flexibilität kann ein System aufweisen, um Störungen (z. B. auch mithilfe geeigneter Steuerungsmaßnahmen) abzufedern bzw. schnell zu überwinden, ohne dass es zu katastrophalen Zustandsänderungen kommt (Johansen/Rausand 2014, S. 276). Angesichts dieser vielschichtigen Zusammenhänge ist die Analyse der Vulnerabilitätseigenschaften eines Systems (z. B. Instabilitäten von Systemkomponenten, überraschendes Systemverhalten) wichtig, um auf mögliche Bedrohungen vorbereitet zu sein (Johansen/Rausand 2014, S. 280). Besonders problematisch für komplexe soziotechnische kritische Infrastrukturen sind systemische Risiken.

---

#### Systemische Risiken

Unter Risiken werden – sehr allgemein gesprochen – mögliche Ereignisse mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit verstanden, die mit negativen Auswirkungen einhergehen. Als systemisch werden in der Regel solche Risiken



bezeichnet, die »weit über den Ort ihres Ursprungs oder ihrer unmittelbaren Wirkung hinaus negative Effekte in anderen Bereichen oder Systemen haben – Effekte, die sich im Verlauf der Risikoausbreitung noch verstärken können« (OECD 2003, S. 30; Renn/Keil 2008, S. 350). Der Begriff des systemischen Risikos stammt ursprünglich aus der Finanzwissenschaft, wird inzwischen aber darüber hinaus auch auf ökologische oder soziotechnische Systeme angewendet. Potenzielle Bedrohungen, wie z. B. Naturkatastrophen, Störfälle, Terrorangriffe, menschliches Versagen oder Instabilitäten von Systemkomponenten (Renn/Keil 2008, S. 350), die die Funktionsfähigkeit von Systemen mit kritischer Bedeutung für die Gesellschaft – wozu auch kritische Infrastrukturen gehören – gefährden, sind als systemische Risiken zu verstehen (Renn et al. 2022, S. 1903). Legt man diese Definition zugrunde, sind alle Risiken, die kritische Infrastrukturen und ihre Dienstleistungen zum Versagen bringen können, als systemische Risiken zu klassifizieren. Wesentlich ist, dass ein weitreichender Ausfall des Systems droht, der dessen Funktionsfähigkeit gefährdet. In der Literatur werden fünf charakteristische Merkmale von systemischen Risiken hervorgehoben (Renn 2019; Renn et al. 2022; Schweizer/Renn 2019a):

- › *Komplexität*: Systemische Risiken sind durch hohe Komplexität gekennzeichnet, was die Identifizierung kausaler Zusammenhänge erschwert. Sie können im Lauf ihrer Entwicklung mit konventionellen Risiken interagieren und konvergieren.
- › *Grenzüberschreitung*: Obwohl sie ihren Ursprung in einem bestimmten System oder Ereignis haben, breiten sich systemische Risiken auf andere Systeme aus – über geografische, sektorale oder soziale Grenzen hinweg.
- › *Stochastische Wirkungsketten*: Die Ergebnisse von systemischen Risiken sind stochastisch und nicht deterministisch. Für Teileffekte können kausale Parameter und Einflussfaktoren identifiziert werden.
- › *Kipppunkte*: Systemische Risiken sind oft durch Kipppunkte gekennzeichnet, die ein Schwellenverhalten aufweisen und bei denen komplexe Systeme plötzliche und drastische Veränderungen erfahren können.
- › *Verzögerte Wahrnehmung und Regulierung*: Die Wahrnehmung und Regulierung von systemischen Risiken erfolgt häufig verzögert und Maßnahmen werden als fragmentiert wahrgenommen (z. B. beim Klimawandel).

In Bezug auf die Identifizierung systemischer Risiken gibt es verschiedene Risikoanalysen. Gemäß dem Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG)<sup>5</sup> ist der Bund verpflichtet, in Kooperation mit den Bundesländern eine Risikoanalyse für den Zivilschutz durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Analyse müssen dem Deutschen Bundestag vom Bundesministerium des Innern (BMI) jährlich mitgeteilt werden (Bundesregierung 2011). Die Risikoanalyse deckt ein breites Spektrum an systemischen Risiken ab. Dazu gehören Naturgefahren, wie

---

<sup>5</sup> Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz vom 25.3.1997, zuletzt geändert am 19.6.2020

meteorologische Ereignisse (z. B. Stürme, Sturmfluten, Starkniederschläge, Kälte- und Hitzewellen), hydrologische Gefahren (z. B. Hochwasser, Niedrigwasser und Wasserknappheit), geophysikalische Gefahren (z. B. Erdbeben, Bergstürze, Meteoriteneinschläge) sowie biologische Gefahren (z. B. Infektionskrankheiten, Tierseuchen). Darüber hinaus werden Risiken berücksichtigt, die durch menschliches oder technisches Versagen entstehen können, sowie solche, die auf kriminelle oder terroristische Handlungen zurückzuführen sind und die Freisetzung von biologischen, chemischen und radioaktiven Stoffen miteinschließen können (mehr hierzu in TAB 2024; im Erscheinen).

Wie sich systemische Risiken auf Infrastruktursysteme auswirken, hängt sowohl von systeminternen als auch -externen Faktoren ab. Üblicherweise braucht es ein auslösendes Ereignis, das auf das System einwirkt. Damit diese Einwirkung zum Systemzusammenbruch führt, müssen zudem bestimmte systemische Bedingungen gegeben sein, insbesondere eine hohe Vulnerabilität bzw. eine geringe Resilienz des Systems gegenüber äußeren Störungen. Entsprechend müssen bei der Analyse der Gefährdungslage kritischer Infrastruktursysteme zum einen Veränderungen in den Umfeldbedingungen, die schädliche Ereignisse auslösen können, beobachtet werden. Zum anderen gilt es, die Kapazitäten des Sektors, auf Störungen zu reagieren, zu analysieren.

---

## Trends und Einflussfaktoren

Systemische Risiken für komplexe soziotechnische Infrastruktursysteme sind fast immer multifaktoriell bedingt. Typische Beispiele für Ereignisse, die systemische Risiken auslösen können, sind Pandemien und der Klimawandel (Schweizer 2023, S. 3 ff.; Schweizer/Renn 2019b, S. 217) sowie Naturkatastrophen und Terrorangriffe (Renn/Keil 2008, S. 350). Generell tragen »Kontextfaktoren aus den Domänen der Demografie, der Umwelt, der Technologie und der sozioökonomischen Strukturen« maßgeblich zur Entstehung systemischer Risiken bei (Schweizer/Renn 2019b, S. 213). Insbesondere bei kritischen Infrastrukturen ist es essenziell, ihre Resilienz gegenüber schädlichen Einflüssen zu stärken. Sie müssen so gebaut und gestaltet werden, dass ihre Basisinfrastruktur möglichst lange bestehen bleiben kann und durch Instandhaltung, Aktualisierung sowie Integration neuer Technologien gepflegt und nach Bedarf optimiert wird. Wichtig ist, dass die jeweiligen Infrastrukturen sich an neue Umfeldbedingungen (z. B. technologische Entwicklungen, Anforderungen durch Politik und Gesellschaft oder veränderte marktwirtschaftliche Bedingungen) anpassen können (Zio 2016).

Veränderungen in den Umfeldbedingungen lassen sich am ehesten über die Analyse der Entstehung und Entwicklung soziotechnischer Trends untersuchen. Der Trendbegriff stammt aus der Marktforschung und der wirtschaftlichen Statistik und hat eher eine phänomenologische Bedeutung. Er beschreibt eine



Veränderung, ohne dass eine Bewertung der Kausalität erforderlich ist. Unsicherheiten können durch gegenläufige Entwicklungen (Gegentrends) oder Sättigungseffekte innerhalb eines Trends auftreten. Außerdem ist ein plötzlicher Trendbruch (z. B. aufgrund äußerer Umstände) möglich. Laut Definition des Zukunftsbüros des BMBF (2022, S. 4) beschreibt ein Trend »einen relevanten Sachverhalt, der seit einiger Zeit beobachtbar ist und eine nachhaltige Entwicklung zeigt. Er ist nicht zyklisch, (empirisch) beschreibbar und verfügt über eine Reichweite von mindestens 10 bis 20 Jahren«. Bei Trends handelt sich also um mittels statistischer bzw. empirischer Methoden erfassbare Entwicklungen. Ein Merkmal ist ihr Gegenwartsbezug, denn sie beschreiben eine Zustandsveränderung, die sich aktuell vollzieht (Deckers/Heinemann 2008). Im Rahmen der Trendforschung werden aus den gegenwärtigen Gegebenheiten Annahmen abgeleitet, die es ermöglichen, prognostische Abschätzungen über zukünftige Entwicklungen, wie z. B. potenzielle systemische Risiken, zu treffen.

Trends und ihre Auswirkungen können anhand verschiedener Kriterien unterschieden und kategorisiert werden. Um besser zu verstehen, wie sie als externe Faktoren auf Systeme einwirken und welche Chancen, aber auch Risiken sie mit sich bringen, können sie bestimmten Kategorien zugeordnet werden. Im Rahmen der STEEP-Umfeldanalyse werden beispielsweise die folgenden fünf Bereiche unterschieden (UNDP 2022):

- › *Soziale Faktoren* umfassen gesellschaftliche Entwicklungen wie demografischer und kultureller Wandel, menschliche Verhaltensänderungen und Lebensstil.
- › *Technologische Faktoren* resultieren aus wissenschaftlicher Forschung, technischem Fortschritt, Innovationen und Produktentwicklungen.
- › *Ökonomische Faktoren* betreffen das wirtschaftliche Umfeld, wie z. B. gesamtwirtschaftliches Wachstum, Zinsen, Einkommen, Markt- und Wettbewerbsumfeld.
- › *Ökologische Faktoren*: Hierzu gehören Umweltveränderungen wie der Klimawandel oder der Biodiversitätsverlust, aber auch ökologische Auswirkungen von Produkten und/oder Dienstleistungen.
- › *Politische Faktoren* umfassen Gesetzgebung, nationale und internationale Konflikte und alle weiteren politischen Einflüsse (z. B. aus den Bereichen Handel, Sicherheit, Finanzen).

Weitere Aspekte, mit denen sich Trends differenzieren lassen, sind Fristigkeit, Tiefe, Reichweite und Auswirkungen. Ein einheitliches Schema für die Einteilung der Trends nach ihrer Fristigkeit (Dauer) existiert in der Trend- bzw. Zukunftsforschung nicht. Üblicherweise werden kurzfristige (bis ca. 5 Jahre), mittelfristige (5 bis deutlich über 10 Jahre) und langfristige Trends (etwa ab 15 bis 50 Jahre) unterschieden (Kreibich et al. 2011). Neben der Kategorisierung und Abschätzung der Fristigkeit können Trends nach der Art ihres Einflusses auf das System (inkrementell oder disruptiv) und der Charakterisierung möglicher

Auswirkungen beschrieben werden. So werden Trends unterschieden, die abstrakt, langlebig und robust sind und die ihre tiefgreifende Wirkung global entfalten. Es gibt aber auch Trends, die nur in ausgewählten Bereichen des gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Lebens wirken und damit greifbare, kurzlebige Phänomene sind. Die Trendkategorien hängen zusammen und beeinflussen sich gegenseitig, sodass kurzlebige Trends als Indikatoren für tiefgreifendere dienen können (Postma/Papp 2021). Umgekehrt kann das Verständnis langfristiger Trends helfen, kurzlebige Trends zu antizipieren.

Für die Analyse der Vulnerabilität bzw. Resilienz kritischer Infrastrukturen sind vor allem Mega- sowie Makro- und Mesotrends von maßgeblicher Bedeutung:

- › *Megatrends* (auch Globaltrends genannt) sind langanhaltende und tiefgreifende Kräfte, die auf globaler Ebene ein breites Spektrum von Aktivitäten, Prozessen und Wahrnehmungen in zahlreichen Bereichen beeinflussen werden, möglicherweise über Jahrzehnte (Naiburg/Aburdene 1992). Sie treiben die Trends auf der Meso- und Makroebene voran (EFP 2023). Megatrends sind vielschichtig, von hoher Heterogenität und durch Wechselwirkungen mit anderen Trends und Gegentrends gekennzeichnet (Göll 2020). Sie zeichnen sich zudem durch ihren globalen Einfluss aus, der jedoch nicht in allen Bereichen der Gesellschaft und Wirtschaft gleichzeitig und in gleichem Maße spürbar ist. Beispiele für Megatrends sind der Klimawandel, die Globalisierung, die Digitalisierung und die Urbanisierung.
- › *Makro- und Mesotrends* spielen sich auf der Ebene von Gesellschaften bzw. Organisationen ab und umfassen sich abzeichnende Muster des Wandels, die Akteure auf staatlicher Ebene, Unternehmen oder große gesellschaftliche Gruppen betreffen. Sie sind tendenziell durch eine mittelfristige Wirkungsdauer gekennzeichnet und lassen sich bestimmten Megatrends zuordnen bzw. werden von diesen beeinflusst. Zu den Makro- und Mesotrends gehören beispielsweise viele der aus TA-Perspektive besonders relevanten technologischen Trends, die im Zuge der Digitalisierung an Bedeutung gewinnen und die Vulnerabilität von Systemen stark beeinflussen können (Strauß/Bettin 2023, S. 17). Ein Beispiel für einen technologischen Makrotrend, der die industrielle Produktion grundlegend verändert, ist die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mithilfe von IKT (Industrie 4.0).

---

## Resilienz

Zur Charakterisierung der Vulnerabilität eines Systems gehört neben der Beschreibung möglicher Einflussfaktoren auf das System, aus denen systemische Risiken erwachsen könnten, die Abschätzung dessen Fähigkeit, möglichen Störungen standzuhalten und diese zu bewältigen – sprich seiner Resilienz.



Das Resilienzkonzept hat eine sehr wechselvolle Vorgeschichte: Ursprünglich aus der Psychologie stammend wurde es in den 1970er Jahren in die Katastrophen- und Ökosystemforschung übertragen und dient heute auch dazu, Eigenschaften sozialökologischer sowie soziotechnischer Systeme zu beschreiben. Entsprechend variieren die wissenschaftlichen Definitionen und Verständnisse stark und sind teilweise widersprüchlich. In einem sehr allgemeinen Sinn bezeichnet Resilienz die Fähigkeit von komplexen Systemen – seien es Ökosysteme, Infrastruktursysteme oder Organisationen –, mit Störungen, Stress oder Schocks umzugehen und sich davon zu erholen (Olsson et al. 2015, S. 2 u. 9). Dafür ist z. B. die redundante Auslegung wichtiger Systemkomponenten notwendig, sodass Ausfälle einzelner Komponenten kompensiert werden können (z. B. alternative Bahnstrecken, Notfallaggregate), das Vorhandensein von Notfallplänen und geschultem Personal für den Umgang mit Störungen oder auch die Substituierbarkeit von Einzelkomponenten (Lenz 2009, S. 58; Strauß/Bettin 2023, S. 16). Ein resilientes System widersteht nicht nur äußeren Einflüssen und absorbiert diese, sondern es ist in der Lage, sich zu erholen und zu transformieren, und es tut dies nicht nur rechtzeitig, sondern auch in effizienter Weise (UNDRR o. J.). Resilient ist ein System gemäß dieser Definition folglich, wenn es die Fähigkeit besitzt, nicht nur Schockereignisse zu überstehen, sondern auch gestärkt aus der Situation herauszugehen (Böschen et al. 2017, S. 216) oder gar auf unvorhergesehene externe Faktoren zu reagieren (Leopoldina et al. 2021).

Nach dem zuvor skizzierten Verständnis ist Resilienz allerdings kein statisches Merkmal, sondern umfasst vor allem auch dynamische Aspekte. Sie ist als Fähigkeit von Systemen zu verstehen, sich kontinuierlich an verändernde Bedingungen und Störereignisse anzupassen (TAB 2024; im Erscheinen). Dabei werden üblicherweise drei Phasen unterschieden (hier und im Folgenden (Gunderson/Holling 2002 nach; Rudloff 2022)):

- › *Absorption* als die Fähigkeit des Systems, bereits eingetretene Schäden aufzufangen oder abzumildern;
- › *Adaption* als die Fähigkeit des Systems, sich auf mögliche Schadensereignisse und Stressfaktoren vorzubereiten, um Schäden zu minimieren;
- › *Transformation* als die Fähigkeit des Systems, sich weiterzuentwickeln und neue und nachhaltigere Strukturen zu nutzen, wo vorhandene Strukturen nicht mehr tragfähig sind.

Zur Stärkung der Resilienz eines Systems ist dementsprechend ein Verständnis darüber notwendig, wie eine Veränderung von Umfeldfaktoren oder Systemeigenschaften sich sowohl auf die aktuelle als auch auf die zukünftige Funktionsweise des Systems und auf seine Fähigkeit, sich weiterzuentwickeln, auswirken könnte (Mentges et al. 2023, S. 33). Im Gegensatz zum Ansatz des Risikomanagements geht es beim Resilienzmanagement auch darum, die zeitliche Dimension zu integrieren, sprich die Fähigkeit des Systems zu bewerten, nicht nur



unter den aktuellen, sondern auch unter künftigen Rahmenbedingungen widrige Ereignisse zu absorbieren und sich davon zu erholen. Deswegen ist die Stärkung von Resilienz eine permanente Aufgabe (Linkov et al. 2014, S. 407). Diese Aufgabe erfordert es, laufend Entwicklungen zu beobachten, aus denen sich Schwachstellen im System ergeben könnten (Tapia et al. 2020, S. 23).

---

## Fazit

Um Infrastruktursysteme zukunftssicher zu machen, ist es erforderlich, systemische Risiken und die sie befördernden Entwicklungen bzw. auslösenden Ereignisse frühzeitig zu antizipieren. Hilfreich sind hierbei die Beobachtung soziotechnischer Trends (insbesondere auf den Mega-, Makro- und Mesoebenen), die sich fünf Umfeldkategorien zuordnen lassen, sowie die Analyse von möglichen Trendauswirkungen auf das Infrastruktursystem und von dessen Bewältigungskapazitäten. Aus einer solchen Analyse können Hinweise für die Stärkung der Resilienz von Infrastruktursystemen abgeleitet werden. Die resiliente Ausgestaltung ist als ein fortlaufender Transformationsprozess an sich kontinuierlich verändernde Umfeldbedingungen zu verstehen.

^>  
v

---

## 4 Fallbeispiel Energiesystem

Wie in Kapitel 2 dargelegt, verfügen alle kritischen Infrastruktursysteme über eine hohe Komplexität sowohl in struktureller als auch dynamischer Hinsicht. Jedoch ist der Energiesektor – wie zunehmend auch der IKT-Sektor – besonders hervorzuheben. Denn ein funktionierendes Energiesystem ist unerlässlich für die Funktionsfähigkeit aller anderen Infrastruktursysteme (Strauß/Bettin 2023, S. 12): Gebraucht wird Energie für sämtliche Prozesse und Anwendungen, beispielsweise zur Beleuchtung, für den Betrieb von Informations- und Kommunikationstechnik, zur Erzeugung von Kälte sowie mechanischer Energie (Stromanwendungen), für den Betrieb von Anlagen sowie für Verkehr und Logistik, zur Wärmeversorgung von Gebäuden und zur Erzeugung von Prozesswärme für die Industrie (Sterchele et al. 2020).

Für Verbraucher/innen ist die Versorgung mit Energie in der Regel eine selbstverständliche Angelegenheit: Der Strom kommt kontinuierlich aus der Steckdose, die Heizung lässt sich über den Thermostaten regulieren und flüssige Brennstoffe sind an Zapfsäulen erhältlich. Allerdings erfordert die störungsfreie Erbringung dieser Dienstleistungen den reibungslosen Ablauf einer Vielzahl von Prozessen, die eng aufeinander abgestimmt sein müssen. Zu den einzelnen Aufgaben gehören insbesondere:

- › *Förderung oder Import von primären Energieträgern:* Primärenergieträger, wie Gas, Rohöl, Braun- und Steinkohle oder Uran, sind Energierohstoffe, die in unverarbeiteter Form vorliegen und nicht direkt verbraucht werden können. Sie müssen in Deutschland gefördert (Braunkohle) oder – wie im Fall von Gas und Rohöl – nach Deutschland eingeführt werden. Abgesehen von den erneuerbaren Energieträgern (Solar-, Wind-, Wasserkraft) und Biomasse, die ebenfalls zur Primärenergie zählen, ist Deutschland bei den meisten Primärenergieträgern – bis auf Braunkohle – auf Importe aus dem außereuropäischen Ausland und damit funktionierende globale Lieferketten angewiesen (UBA o. J.d).
- › *Energieumwandlung:* Primärenergie muss für gewöhnlich in Sekundärenergie umgewandelt werden, damit sie in verbrauchsfertiger Form, also als Brenn- oder Kraftstoff, Fernwärme oder Strom, vorliegt. Die Art der Umwandlung und Aufbereitung unterscheidet sich bei den verschiedenen Primärenergieträgern, erfordert teils großtechnische Anlagen (u. a. Raffinerien, Kraftwerke, Biogasanlagen) und ist in der Regel mit mehr oder weniger großen Umweltbelastungen (z. B. Treibhausgasemissionen) und Umwandlungsverlusten verbunden.
- › *Speicherung:* Auch wenn die Speicherung bisher von Bund und Ländern nicht als kritische Dienstleistung (BBK o. J.b) eingestuft wurde, spielen Energiespeicher im Zuge der Umstellung auf nichtfossile Energieträger eine



zunehmend wichtige Rolle für ein funktionierendes Energiesystem. Grund dafür ist, dass das Angebot an erneuerbaren Energien fluktuiert und deshalb unter Umständen für eine spätere Nutzung zwischengespeichert werden muss. Infrage kommen dafür die elektrische Speicherung in mobilen und stationären Batterien, Pumpspeicherwerkstätten, aber auch elektrochemische Speicher (z.B. Wasserstoff). Die Speicherlösungen setzen wiederum den Aufbau eigener Infrastrukturen bzw. Anlagen voraus (z.B. Batterieproduktion, Elektrolyseure) sowie spezifische kritische Rohstoffe, die in der Regel importiert werden müssen und deren Versorgungslage oft unsicher ist.

- *Transport und Verteilung:* Die verschiedenen stofflichen Energieträger sowie elektrische Energie müssen schließlich transportiert und an die Verbraucher/innen verteilt werden. Dafür sind entweder ausdifferenzierte logistische Prozesse erforderlich, um z.B. die verschiedenen Treibstoffarten entlang der Lieferkette (Raffinerie, Zwischenlager) zu den Verkaufsstellen zu transportieren, oder es werden dafür spezielle Verteilnetze genutzt, z.B. für die Übertragung/Verteilung von Strom, Gas oder Fernwärme. Insbesondere das Stromnetz steht im Zuge der Umstellung auf dezentral erzeugte erneuerbare Energien vor größeren Aus- und Umbaubedarfen, aber auch für neue Energieträger wie Wasserstoff müssen geeignete Speicher- und Netzinfrastrukturen aufgebaut werden.

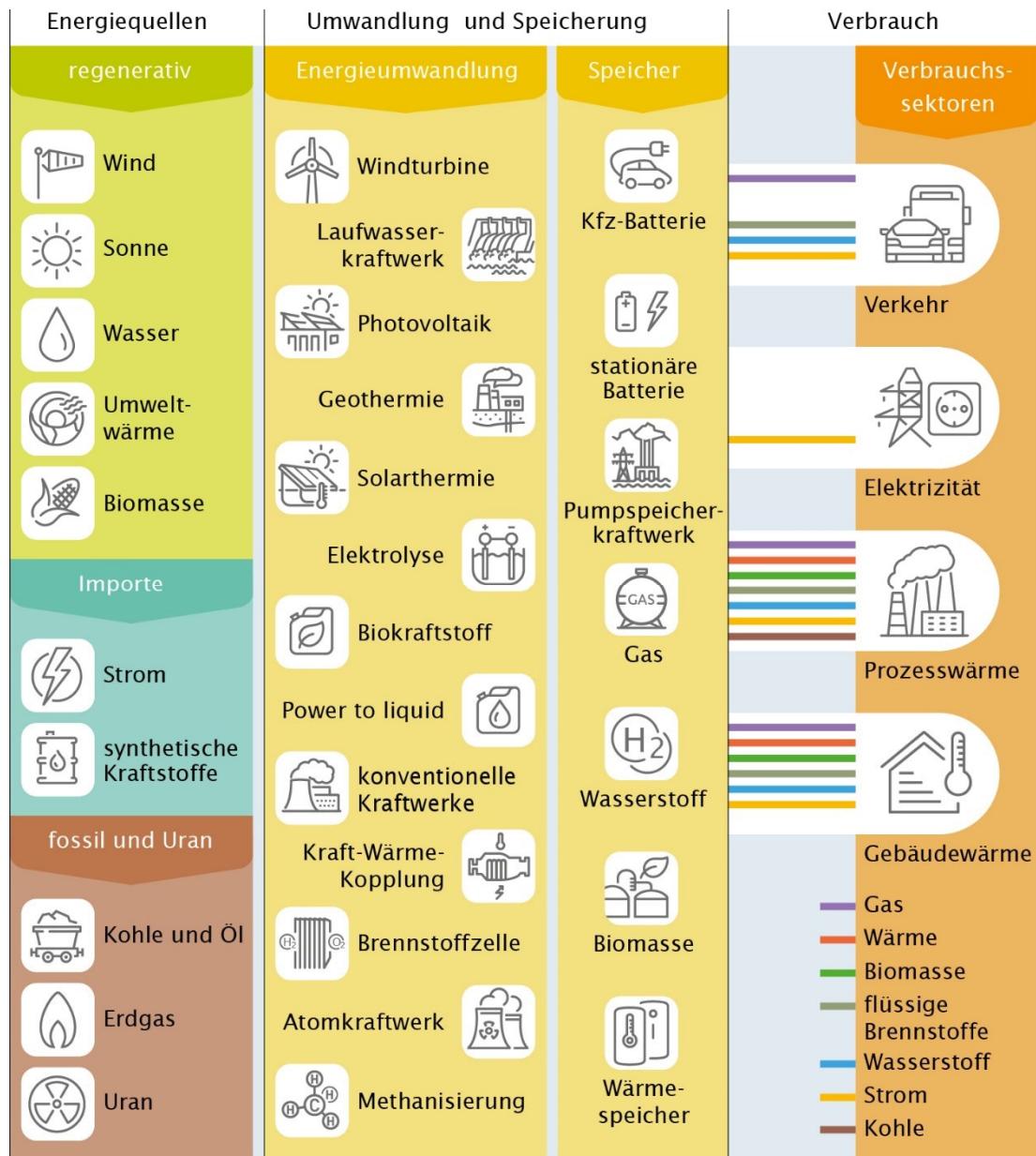
Abbildung 4.1 zeigt die verschiedenen Energiequellen, die wichtigsten Technologien für Energieumwandlung und -speicherung sowie die Verbrauchssektoren gegliedert nach den wesentlichen Nutzungsformen (Sterchele et al. 2020, S. 13).

---

### Zunehmende Komplexität

Die Komplexität des Energiesystems ergibt sich nicht zuletzt daraus, dass Energie in sehr unterschiedlichen Stoffen und Formen gespeichert und weitergegeben werden kann, was eine große Vielfalt an Anlagen und Infrastrukturen bedingt. So lässt sich Biomasse als primärer Energieträger beispielsweise über unterschiedliche Nutzungspfade verwerten: entweder direkt (z.B. Holzverbrennung) oder indirekt nach Umwandlung in einen anderen Energieträger (z.B. Wasserstoff, Methan oder flüssige Brennstoffe, Biodiesel). Auch Strom wird sowohl importiert als auch aus unterschiedlichen primären Energieträgern erzeugt. Er wird für den direkten Endverbrauch bereitgestellt, dient aber beispielsweise auch zur Erzeugung von Wärme oder in gespeicherter Form für die Elektromobilität. Entsprechend stark differieren die für den Endverbrauch erforderlichen Aufbereitungspfade (Sterchele et al. 2020, S. 13 ff.), aber auch die dafür maßgeblichen ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen, die für Strom beispielsweise ganz andere sind als für Rohöl, sowie die mit Import, Handel, Aufbereitung und Verteilung von Energie befassten Einrichtungen und Unternehmen.

Abb. 4.1 Quellen, Umwandlung/Speicherung und Verbrauch von Energie



Quelle: nach Sterchele et al. 2020, S. 13

Insgesamt ist der Energiesektor dementsprechend durch eine überaus hohe Akteursvielfalt, eine große Diversität technischer Komponenten, Anlagen und Netze gekennzeichnet. Aktuell unterliegt er zusätzlich einer besonders hohen Veränderungsdynamik. Verantwortlich dafür sind zum einen geopolitische Konflikte – insbesondere der Angriff Russlands auf die Ukraine – die beim wichtigen Primärenergieträger Erdgas zu einem Wegfall der etablierten Versorgungsstrukturen, zu einem umfangreichen Umbau der Gasversorgung (u.a.



Ausbau der Infrastruktur für Flüssiggas) und einer Reduktion der Abhängigkeit von Erdgas aus Russland führte. Nicht zuletzt sind die Unverzichtbarkeit des Energiesektors für Gesellschaft und Wirtschaft sowie mögliche Auswirkungen seiner großflächigen Störung durch die Gaskrise erneut in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Neben der Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern sind Klimaneutralität bis 2045 und eine störungsfreie Energieversorgung, die wirtschaftlich und für Industrie und Haushalte bezahlbar bleiben soll, wichtige gesellschaftspolitische Ziele (Prognos 2022), die jedoch in der Umsetzung in Konflikt geraten können (Luderer et al. 2022). So hat die Gaskrise im Zuge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine kurzfristig auch zu einer steigenden Bedeutung der klimaschädlichen Energieträger Kohle und Öl geführt.

Infolge dieser Entwicklungen müssen nicht nur Energieinfrastrukturen wie das Stromnetz aus- und neue Infrastrukturen (z.B. für Flüssiggas oder Wasserstoff) aufgebaut, sondern auch Lösungen gefunden werden, mit denen sich die Volatilität der erneuerbaren Energien ausgleichen lässt. Es ist klar, dass die Komplexität des Sektors dadurch in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird, was sich in einer wachsenden Konvergenz mit anderen Sektoren, einer zunehmenden Vielfalt an Technologien sowie Akteuren manifestiert:

- › *Konvergenz mit anderen Sektoren:* Verantwortlich dafür sind Digitalisierung und Sektorenkopplung. Die Digitalisierung bietet für die Transformation des Energiesystems große Chancen, da die Koordination der zahlreichen, heute teilweise noch unbekannten Marktteilnehmer künftig weitgehend automatisiert mithilfe von IKT erfolgen muss, um die neue Komplexität der Akteure und Technologien bewältigen zu können (Korzynietz et al. 2023, S. 191). Energie- und IKT-System verschmelzen dadurch zu einem »cyberphysischen Gesamtsystem«, wodurch neue Abhängigkeiten und Wechselwirkungen entstehen (Tapia et al. 2020). Dasselbe gilt auch für die Sektorenkopplung. Darunter wird die Vernetzung des Stromsektors mit den Sektoren Industrie (Prozesswärme), Verkehr und Gebäudewärme verstanden (Korzynietz et al. 2023, S. 181) – Bereiche, deren Versorgung bisher weitgehend getrennt voneinander sichergestellt wurde, die im Zuge der Ersetzung fossiler Energien nun aber zunehmend elektrifiziert werden (Büscher et al. 2020).
- › *Wachsende technologische Vielfalt:* Mit der schwindenden Bedeutung konventioneller fossiler Kraftwerke kommt Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie Stromspeichern wie Power-to-X-Technologien oder Batterien eine immer wichtigere Rolle zu (Büscher et al. 2020; UBA o.J.b). Bei den Transportwegen ist künftig nicht nur an den Import von primären natürlichen Energieträgern zu denken, sondern auch von aus erneuerbaren Energien hergestellten synthetischen Energieträgern wie Wasserstoff, Methan, flüssige Kraftstoffe. Bei der Wärmebereitstellung werden neben konventionellen Heizkesseln auf Basis von fossilen Energieträgern wie Methan, Biomasse oder Öl

neuerdings vermehrt auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Wärmepumpen unterschiedlicher Bauart sowie Brennstoffzellensysteme basierend auf Methan oder Wasserstoff eingesetzt (Sterchele et al. 2020, S. 14). Im Zuge der Digitalisierung spielen schließlich zunehmend intelligente Netze mit neuen Mess-, Steuer- und Regelungstechniken (dena o. J.) eine zentrale Rolle, die dafür eingesetzt werden, Verbrauch und Nachfrage nach Energie besser aufeinander abzustimmen, was im Zuge einer zunehmend dezentralen und fluktuierenden Energierzeugung an Bedeutung gewinnt.

- › *Veränderte Akteursstruktur:* Durch den Kohle- und Atomausstieg werden vermehrt Großkraftwerke außer Betrieb genommen und im Gegenzug vervielfacht sich die Anzahl der Akteure, die sich dezentral an der Energieerzeugung beteiligt (Prosumenten, die Energie sowohl erzeugen als auch verbrauchen, z. B. über Photovoltaikanlagen). Diese Tendenzen brechen die traditionelle Struktur einer geringen Anzahl von Produzenten und einer großen Anzahl an Konsumenten auf (Büscher et al. 2020; Strauß/Bettin 2023, S. 25). Neue Markakteure und Geschäftsmodelle entstehen in der Energieversorgung (z. B. Marktplattformen für den Energiehandel; Leopoldina et al. 2021, S. 20), eine Tendenz, die durch die Digitalisierung des Energiesystems verstärkt wird (Dekker/van Est 2020, S. 34).

---

### **Wachsende systemische Risiken**

Bereits seit Längerem wird diskutiert, welche Folgen bei einem langanhaltenden Stromausfall zu erwarten wären und wie gut Deutschland bzw. deutsche Städte und Kommunen auf einen solchen Fall vorbereit sind (TAB 2010). Wie relevant diese Fragen nach wie vor sind, zeigen aktuelle Beispiele, bei denen Kaskadeneffekte im Energiesystem zu einer unerwarteten Versorgungsunterbrechung geführt haben (Kasten 4.1). Durch die neuen Strukturen, die durch die Dekarbonisierung des Energiesektors und insbesondere durch Dezentralisierung, Sektorenkopplung und Digitalisierung entstehen, steigen die *Unsicherheiten über das künftige Verhalten des Systems* (Korzynietz et al. 2023; Leopoldina et al. 2021). Je komplexer das Energiesystems wird, desto schwieriger wird es, Stromangebot, Netzbedarf und -nachfrage zu synchronisieren. Diese Entwicklungen fordern »technologische Paradigmen und Wirtschaftsstrukturen sowie individuelle und kollektive Handlungsmuster heraus« (Büscher et al. 2020, S. 17) und werfen neue Regulierungsfragen auf (z. B. Marktzugangsrechte, Dateneigentum) (Dekker/van Est 2020, S. 34; Korzynietz et al. 2023, S. 191).

Auf der einen Seite erhöhen Dezentralisierung, Digitalisierung und Sektorenkopplung die Flexibilität des Energiesystems, was dabei helfen kann, Schwankungen bei der Stromerzeugung auf Grundlage erneuerbarer Energien auszugleichen. Außerdem entstehen tendenziell durch die Dezentralisierung



auch redundante Strukturen, welche die Resilienz des Gesamtsystems erhöhen können (Büscher et al. 2020, S. 21).

### **Stromausfall in Texas**

Am 14. Februar 2021 zogen schwere Winterstürme über weite Teile der Vereinigten Staaten, darunter auch über den Bundesstaat Texas. Das Stromnetz des Bundesstaates fiel aus, sodass mehr als 3 Mio. Haushalte während 4 Tagen ohne Strom waren. Diese Stromausfälle wurden nicht allein durch die extremen Wetterbedingungen ausgelöst. Vielmehr zeigt die Rekonstruktion des Ereignisses, wie unterschiedliche Einflussfaktoren zusammenwirkten und zur Katastrophe führten: problematische Wartungspraktiken, unzureichende Investitionen in eine angemessene Überwinterung, fehlende Verbindungen zu zwei anderen Hauptverbindungsleitungen des US-Stromnetzes und Herausforderungen bei der Verwaltung des Netzes. Die Auswirkungen wurden durch Faktoren wie soziale Ungleichheiten verstärkt (Clark-Ginsberg et al. 2021).

Auf der anderen Seite bringen diese Entwicklungen aber auch neue systemische Risiken mit sich, nicht zuletzt bedingt durch die Komplexität der notwendigen Transformation, die in kürzester Zeit zu vollbringen ist (Korzynietz et al. 2023). So wird durch die umfassende Elektrifizierung von Gebäuden (Kühlen und Heizen mit Wärmepumpen), von Verkehr (Elektromobilität) und industriellen Prozessen der Strombedarf sehr schnell deutlich steigen (Leopoldina et al. 2021, S. 2). Allein der Strombedarf für Elektroautos könnte sich beispielsweise bis 2030 versiebenfachen (Statista o. J.). Zusammen mit dem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien führt das zu stark steigenden Anforderungen an das Stromnetz und macht eine umfangreiche Anpassung der Netzinfrastruktur sowie der Netzsteuerung erforderlich (UBA o. J.c). Zu den wachsenden systemischen Risiken gehören außerdem neue Angriffsmöglichkeiten für Cyberkriminelle (z. B. über Smart Meter) und Abhängigkeiten von Anbietern digitaler Dienste bzw. dafür notwendiger Komponenten (z. B. Halbleiter) (Strauß/Bettin 2023, S. 25 f.). Diese neuen Abhängigkeiten können zu unvorhergesehenen oder gar unvorhersehbaren Ereignissen mit großem Bedrohungspotenzial führen (Leopoldina et al. 2021; Strauß/Bettin 2023). Insgesamt ergibt sich so eine hohe Verwundbarkeit gegenüber direkten Angriffen, die neue Ansätze zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit erfordern (Korzynietz et al. 2023; Leopoldina et al. 2021; Zio 2016, S. 139).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit der wachsenden Komplexität des Energiesystems – bedingt hauptsächlich durch die Digitalisierung und Sektorenkopplung – das Risiko steigt, dass Ausfälle in einem Teilsystem zu Kaskadeneffekten führen und Versorgungsunterbrechungen in anderen Teilen



des Systems verursachen (Büscher et al. 2020, S. 21). Gleichzeitig erschwert die steigende technische Systemkomplexität die Vorhersage von Auswirkungen im operativen Betrieb (Leopoldina et al. 2021, S. 24) und es ist bisher weitgehend unklar, nach welchen Gesetzmäßigkeiten sich Störereignisse auf das Energiesystem auswirken und wie es resilenter ausgestaltet werden kann. Obwohl die Risiken, die mit der Kopplung von Sektoren einhergehen, grundsätzlich bekannt sind, fehlt es an Studien, in denen die Gefahren und Ungewissheiten, die mit dem Betrieb von integrierten Infrastrukturen verbunden sind, im Detail erörtert wurden.

^>  
v

---

## 5 Schlussfolgerungen und mögliche Vertiefungsthemen

Alle kritischen Infrastruktursysteme verfügen über einen hohen Grad an Systemkomplexität und sind qua Definition grundlegend für die Funktionsfähigkeit unserer Gesellschaft. Das Energiesystem ist dennoch in beiderlei Hinsicht besonders hervorzuheben: Zum einen führen die Umstellung auf erneuerbare Energien, die Elektrifizierung von Verkehr, Industrie und Gebäuden (Sektorkopplung) sowie die zunehmende Digitalisierung zu einer enorm steigenden Komplexität dieses kritischen Infrastruktursystems. Zum anderen ist eine funktionierende Energieversorgung für alle kritischen Infrastrukturen unerlässlich und bildet das Rückgrat moderner Industriegesellschaften. Für das Energiesystem werden deshalb die mit dem Zuwachs an Komplexität zusammenhängenden Ausfallrisiken als besonders hoch eingeschätzt, sodass vorgeschlagen wird, das Energiesystem aus der Komplexitätsperspektive näher zu untersuchen. Dazu schlägt das TAB vier Vertiefungsthemen vor, aus denen eins für eine vertiefte Betrachtung im Rahmen einer TA-Untersuchung in Auftrag gegeben werden könnte. Die hier vorgeschlagenen Themen schließen an aktuelle Entwicklungen bzw. systemische Risiken an, die entweder die Komplexität des Energiesystems erhöhen oder durch diese verstärkt werden und damit die Funktionsfähigkeit des Energiesystems grundlegend betreffen:

- › *Systemische Risiken durch Sonnenstürme:* Von einer Sonneneruption spricht man, wenn der Teilchenstrom, den die Sonne kontinuierlich in den Weltraum ausstößt, kurzzeitig deutlich stärker ausfällt. Die entstehende Strahlung kann auf die Erde treffen und einen Sonnensturm verursachen (MPS o. J.). Neben Stromausfällen beispielsweise durch beschädigte Transformatoren kann ein Sonnensturm auch zu Störungen der Satellitenkommunikation, des Flugverkehrs oder des Behördenfunks führen (BABS 2020). Zwar werden Weltraumereignisse in der Resilienzstrategie der Bundesregierung (2022, S. 16) als mögliches Bedrohungsszenario erwähnt, das zum Ausfall oder Zerstörung der digitalen Infrastruktur führen könnte. Dennoch wurden potenzielle Auswirkungen bisher nicht umfassend untersucht, Frühwarnsysteme noch nicht implementiert und Maßnahmen zur Eindämmung der Auswirkungen nicht konzipiert (Bundesregierung 2018 u. 2020; Strauß/Krieger-Lamina 2017, S. 6). Es könnte anhand von Szenarien untersucht werden, wie eine Störung der Stromversorgung oder der digitalen Infrastruktur durch Kaskadeneffekte sich auf die Energieversorgung auswirken könnte. Daraus wären mögliche Präventivmaßnahmen sowie eine Strategie zur Stärkung der Resilienz des Energiesystems gegenüber dieser Art von Ereignis abzuleiten.
- › *Künstliche Intelligenz (KI) im Energiesystem:* Perspektivisch ist davon auszugehen, dass Energiesteuerungsprozesse durch Verfahren der KI unterstützt werden (Korzyńietz et al. 2023, S. 191). Auf der einen Seite bietet KI



vielfältige Potenziale für das Energiesystem (Niet et al. 2023). Bereits jetzt ist ein starker Anstieg der Patente für KI und maschinelles Lernen in energiebezogenen Bereichen zu verzeichnen (Entezari et al. 2023). Ein aktiver Netzbetrieb mittels intelligenter Automatisierungs- und Regelungstechnik kann helfen, schneller mehr Photovoltaikanlagen oder Elektroautos in das Netz zu integrieren (VDE 2023). Bisher haben Automatisierungslösungen in vielen Bereichen (z. B. Nieder- und Mittespannungsnetz, Frequenz- oder Spannungshaltung) allerdings noch Pilotcharakter (VDE 2023). Außerdem soll KI nicht nur im Stromsektor, sondern beispielsweise auch zur Optimierung der Wärmeerzeugung zum Einsatz kommen (ZfK 2023a). Auf der anderen Seite stellt KI ein Risiko für die Vorhersag- und Nachvollziehbarkeit von Handlungen dar (Gährs et al. 2022), sodass bereits kleinere Störungen gravierende Konsequenzen für das gesamte Versorgungssystem haben können – bis hin zum Blackout (Krebs/Hagenweiler 2021, S. 17). Governancestrategien für KI im Energiebereich wurden bisher nicht ausreichend diskutiert (Niet et al. 2023). Es könnte zunächst eine Bestandsaufnahme des aktuellen und perspektivischen Einsatzes von KI im Energiebereich durchgeführt werden. Auf dieser Grundlage könnten die Potenziale und Herausforderungen von KI für die Koordinierung der steigenden Akteursvielfalt bei der Energieerzeugung, für die Produktion von Strom oder Wärme untersucht werden. Dabei könnten sowohl die Chancen für die Flexibilisierung und Diversifizierung der Energieerzeugung sowie für die Stabilisierung des Netzbetriebs als auch die Risiken, die damit einhergehen, betrachtet werden.

› *Rohstoff- und Lieferantenabhängigkeit beim zukünftigen Bau, der Instandhaltung und dem Betrieb kritischer Energieinfrastrukturen:* Im Zuge der geopolitischen Auswirkungen des Angriffs Russlands auf die Ukraine wurden die systemischen Risiken, die mit der Abhängigkeit Deutschlands von ausländischen Importen fossiler Kraftstoffe einhergehen, deutlich und eine Diversifizierung der Gasimporte vorangetrieben. Ähnlich könnten die Investitionen in Wasserstofftechnologien zu Importabhängigkeiten führen (Möst et al. 2023, S. 21). Durch die Förderung und Verbreitung von Technologien für die Energiewende (z. B. Wasserstofftechnologien, Lithium-Ionen-Batterien, Brennstoffzellen, elektrische Traktionsmotoren, Windkraftanlagen) steigt die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen. Engpässe durch Lieferkettenstörungen stellen ein systemisches Risiko für die Energieversorgung dar (Merten/Scholz 2023). Die Widerstandsfähigkeit industrieller Wertschöpfungsketten für die Energiewende hängt von der Höhe der EU-Produktion und der inländischen Versorgung, dem Vorhandensein verschiedener internationaler Lieferanten für kritische Materialien und/oder Komponenten, der Rückgewinnung kritischer Materialien aus Abfallströmen und den vorhandenen Substitutionsmöglichkeiten ab (EP 2021). Im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland stellt sich die Frage, welche neuen

Abhängigkeiten von Rohstoffen bzw. Lieferanten im Energiesystem entstehen und wie sich mögliche Versorgungsengpässe auf die Energieversorgung und/oder den Umbau des Energiesystems auswirken könnten. Im Rahmen eines TA-Projekts könnten Kriterien und Methoden für die Bemessung der Komplexität bzw. von Abhängigkeiten bei der Rohstoffversorgung erarbeitet und die Möglichkeiten der Reduzierung der bestehenden bzw. neuen Abhängigkeiten ausgelotet werden, um die Resilienz zu erhöhen. Dabei sollten mögliche Synergien mit laufenden Forschungsvorhaben wie »KI-gestützte Vorausschau zur Erkennung wertschöpfungsrelevanter Signale« (Fraunhofer IMW o.J.) genutzt werden.

- › *Sicherstellung der Funktionsfähigkeit kritischer Energieinfrastrukturen unter sich verändernden klimatischen Bedingungen:* Einen zentralen Risikofaktor für die Funktionsfähigkeit der Energieinfrastruktur stellen die sich verändernden klimatischen Bedingungen dar, denn diese bringen systemische Risiken mit sich. Infrastrukturen müssen zukünftig Extremwetterereignissen von zunehmender Stärke und Häufigkeit standhalten, wofür sie ursprünglich nicht ausgelegt wurden (ZfK 2023b). Höhere Durchschnitts- und Spitzentemperaturen könnten beispielsweise die Funktionsfähigkeit von E-Batterien beeinträchtigen. Es ist nicht nur an direkte Effekte auf die bestehende Infrastruktur hierzulande zu denken, sondern auch an die Auswirkungen auf Importe (z. B. steigender Kühlungsbedarf von französischen Atomkraftwerken oder von Rechenzentren), die sich bei anhaltenden Dürren auf den Energiebedarf in Deutschland auswirken könnten (Allhutter et al. 2022, S. 67; Krebs/Hagenweiler 2021, S. 13; Möst et al. 2023). Außerdem wirken sich geänderte klimatische Bedingungen aufgrund der stärkeren Wetter- und Jahreszeitabhängigkeit erneuerbarer Energien perspektivisch auch auf die verfügbaren Primärenergiepotenziale aus (Gernaat et al. 2021). Infrastruktursysteme müssen deshalb schon jetzt so gebaut bzw. angepasst werden (inklusive der Versorgungswege), dass sie nicht nur heute, sondern auch unter veränderten klimatischen Bedingungen die Versorgungssicherheit gewährleisten können. Untersucht werden könnte, wie gut ein digitalisiertes und in einer Megainfrastruktur integriertes Energieinfrastruktursystem systemischen Risiken durch klimatische Veränderungen standhalten kann und welche Technologiepfade wie zur Vulnerabilität bzw. Resilienz des Gesamtsystems beitragen können. Dabei sollen nicht nur die Risiken des Klimawandels für die aktuelle Energieinfrastruktur in den Blick genommen (z. B. UBA o.J.a), sondern vor allem Indikatoren für das Monitoring des künftigen Energiesystems erarbeitet werden.

Das Energiesystem dient dabei als Fallbeispiel, um allgemeinere Schlussfolgerungen dahingehend abzuleiten, mit welchen Chancen, aber auch Risiken die wachsende Komplexität von Infrastruktursystemen einhergeht. Relevant sind dabei insbesondere folgende Fragen:



- › Unter welchen Bedingungen trägt Komplexität zur Stärkung der Resilienz bei?
- › Lassen sich Kriterien identifizieren, die bei steigender Komplexität ein besonderes Risiko darstellen?
- › Welche Vorkehrungen oder Maßnahmen können negative Auswirkungen zunehmender Komplexität mindern, stoppen oder umkehren bzw. Potenziale von Komplexität heben?

Der Energiesektor zeigt exemplarisch, dass kritische Infrastruktursysteme zwar große Beharrungskräfte aufweisen alleine schon aufgrund ihrer materiellen Basis, aber auch aufgrund der fein austarierten Funktionen, die vom Zusammenspiel vieler Akteure und Einrichtungen abhängen. Gleichwohl unterliegen sie – auch dafür ist der Energiebereich ein hervorragendes Beispiel – kontinuierlichen Veränderungsprozessen, die derzeit gesellschaftspolitisch vorangetrieben werden. Festzuhalten ist deshalb: Für eine Einschätzung relevanter Entwicklungen, welche die Komplexität sowie die sich daraus ergebende Vulnerabilität bzw. Resilienz kritischer Infrastruktursysteme betreffen, sind Einzeluntersuchungen (die immer nur eine Momentaufnahme abbilden können) nur begrenzt geeignet. Aufgrund der Dynamik, der der Energiesektor (wie alle anderen Infrastruktursysteme in mehr oder weniger ausgeprägten Weise) derzeit unterliegt, sind dafür vielmehr ein kontinuierliches, langfristig angelegtes Monitoring von Trends und eine Abschätzung ihrer potenziellen Auswirkungen erforderlich.

Eine entsprechende, fortlaufend angelegte Untersuchung zur Resilienz kritischer Infrastrukturen führt das TAB seit Beginn der Vertragsperiode 2023 bis 2028 im Rahmen seiner erweiterten Foresightaktivitäten durch. Methodisch basiert das Resilienzradar auf der KI-gestützten Quellenanalyse sowie der Befragung von Expert/innen zur Validierung der Ergebnisse. Ausgehend von Themen, die in Gesellschaft, Wissenschaft und Politik aktiv diskutiert werden, werden für eine Auswahl von Sektoren Trends erfasst, die sich auf die Funktionsfähigkeit und Resilienz der jeweiligen kritischen Dienstleistungen und Infrastrukturen kurz-, mittel- oder langfristig auswirken könnten. Auf dieser Grundlage werden für jedes betrachtete Infrastruktursystem Potenziale, aber auch systemische Risiken und Gefährdungslagen abgeschätzt, die durch die identifizierten Trends und Entwicklungen sowie die sich daraus ergebenden Auswirkungen entstehen könnten. Zudem werden Fokusthemen vorgeschlagen, die sich für eine Vertiefung im Rahmen des Resilienzchecks eignen, in dem szenariobasiert tragfähige Resilienzstrategien entwickelt werden.

Da das Infrastruktursystem Energie Gegenstand der ersten Runde des Resilienzradars ist, dessen Ergebnisse im Frühjahr 2024 vorgelegt werden sollen, besteht neben den hier vorgeschlagenen Vertiefungsthemen für den Berichterstatterkreis die Möglichkeit, aus den dann identifizierten Fokusthemen ebenfalls ein Thema zur Vertiefung auszuwählen – sei es im Rahmen des Resilienzchecks oder einer TA-Untersuchung.

---

## 6 Literatur

- Allhutter, D.; Bettin, S.; Brunner, H.; Kleinferchner, J.; Krieger-Lamina, J.; Ornetzeder, M.; Strauß, S. (2022): Sichere Stromversorgung und Blackout-Vorsorge in Österreich. Entwicklungen, Risiken und mögliche Schutzmaßnahmen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien
- Assemblée Nationale (2022): Rapport d'Information déposé en application de l'article 145 du Règlement PAR LA MISSION D'INFORMATION sur la résilience nationale N°5119. [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/resinat/l15b5119\\_rapport-information.pdf](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/resinat/l15b5119_rapport-information.pdf) (9.1.2024)
- BABS (Bundesamt für Bevölkerungsschutz) (2020): Sonnensturm. Katastrophen und Notlagen Schweiz 2020/Gefährdungsdossier. [https://www.babs.admin.ch/content/babs-internet/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/natgefaehrdanalyse/gefaehrd dossier/\\_jcr\\_content/contentPar/accordion/accordionItems/naturbedingte\\_gef hr/accordionPar/downloadlist/downloadItems/142\\_1604482773548.download/15-Sonnensturm-GD-de.pdf](https://www.babs.admin.ch/content/babs-internet/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/natgefaehrdanalyse/gefaehrd dossier/_jcr_content/contentPar/accordion/accordionItems/naturbedingte_gef hr/accordionPar/downloadlist/downloadItems/142_1604482773548.download/15-Sonnensturm-GD-de.pdf) (12.1.2024)
- BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (o.J.a): Sektoren und Branchen KRITIS. [https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/sektoren-branchen\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/sektoren-branchen_node.html) (9.1.2024)
- BBK (o.J.b): KRITIS-Sektor: Energie. [https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/Energie/energie\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/Energie/energie_node.html) (11.1.2024)
- BBK (o.J.c): Was sind Kritische Infrastrukturen und warum sind sie so wichtig? [https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/kritische-infrastrukturen\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/kritische-infrastrukturen_node.html) (9.1.2024)
- BMI (Bundesministerium des Innern und für Heimat) (2023): Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der CER-Richtlinie und zur Stärkung der Resilienz kritischer Anlagen. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/DE/KRITIS-DachG.html> (9.1.2024)
- Böschen, S.; Binder, C.; Rathgeber, A. (2017): Resilienzkonstruktionen: Divergenz und Konvergenz von Theoriemodellen – Eine konzeptionell-empirische Analyse. In: GAIA 26(1), S. 216–224
- BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (o.J.): Was sind Kritische Infrastrukturen? <https://www.bsi.bund.de/dok/kritis-kompakt> (9.1.2024)
- Bundesregierung (2011): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz. Deutscher Bundestag, Drucksache 17/8250, Berlin
- Bundesregierung (2018): Auswirkungen von Weltraumwetter auf elektrotechnische Infrastruktur. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Ralph Lenkert, Dr. Gesine Lötzsch, Lorenz Gösta Beutin, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 19/360 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/493, Berlin
- Bundesregierung (2022): Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen. Umsetzung des Sendai Rahmenwerks für Katastrophenvorsorge (2015–2030) – Der Beitrag Deutschlands 2022–2030. Berlin
- Büscher, C.; Scheer, D.; Nabitz, L. (2020): Future converging infrastructures: Assessing the consequences of increasing sector coupling and integration. In: TATuP 29(2), S. 17–23



- Centeno, M.; Nag, M.; Patterson, T.; Shaver, A.; Windawi, A. (2015): The Emergence of Global Systemic Risk. In: *Annual Review of Sociology* 41, S. 65
- Clark-Ginsberg, A.; DeSmet, D.; Rueda, I. A.; Hagen, R.; Hayduk, B. (2021): Disaster risk creation and cascading disasters within large technological systems: COVID-19 and the 2021 Texas blackouts. In: *Journal of Contingencies and Crisis Management* 29(4), S. 445–449
- Climate Service Center Germany (o.J.): Vulnerabilität. [https://www.climate-service-center.de/products\\_and\\_publications/publications/detail/063303/index.php.de](https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063303/index.php.de) (9.1.2024)
- Deckers, R.; Heinemann, G. (2008): Trends erkennen – Zukunft gestalten. Vom Zukunftswissen zum Markterfolg. Göttingen
- Dekker, R.; van Est, R. (2020): The convergence of electricity and digitalization in the Netherlands: Data governance as an emerging policy issue. In: *TATuP* 29(2), S. 31–37
- Dekker, S.; Cilliers, P.; Hofmeyr, J.-H. (2011): The complexity of failure: Implications of complexity theory for safety investigations. In: *Safety Science* 49(6), S. 939–945
- Dena (Deutsche Energie-Agentur) (o.J.): Umbau mit Blick fürs Ganze. Energiesysteme. <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme> (12.1.2024)
- EFP (European Foresight Platform) (2023): Megatrend/Trend/Driver/Issue. <http://foresight-platform.eu/community/forlearn/how-to-do-foresight/methods/analysis/megatrend-trend-driver-issue/> (9.1.2024)
- Egan, M. (2007): Anticipating Future Vulnerability: Defining Characteristics of Increasingly Critical Infrastructure-like Systems. In: *Journal of Contingencies and Crisis Management* 15(1), S. 4–17
- Entezari, A.; Aslani, A.; Zahedi, R.; Noorollahi, Y. (2023): Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective. In: *Energy Strategy Reviews* 45, Art. 101017
- EP (Europäisches Parlament) (2021): Europäische Strategie für kritische Rohstoffe – P9\_TA(2021)0468. Entschließung des Europäischen Parlaments vom 24. November 2021 zu einer europäischen Strategie für kritische Rohstoffe (2021/2011 [INI]). Angenommene Texte, [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0468\\_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0468_DE.pdf) (14.2.2024)
- Fraunhofer IMW (o.J.): Wertschöpfungsradar: KI-gestützte Vorausschau zur Erkennung wertschöpfungsrelevanter Signale. <https://www.imw.fraunhofer.de/de/foerschung/wissenstransfer/wissenstransferprozesse/projekte/wertschoepfungsradar.html> (12.1.2024)
- Gährs, S.; Bluhm, H.; Kütemeyer, L. (2022): Nachhaltige Digitalisierung einer dezentralen Energiewende. Stand der Forschung, relevante Fragestellungen und aktuelle Herausforderungen. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, ECOLOG – Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung, Berlin
- Gernaat, D. E. H. J.; Boer, H. S. de; Daioglou, V.; Yalew, S.; Müller, C.; van Vuuren, D. (2021): Climate change impacts on renewable energy supply. In: *Nature Climate Change* 11(2), S. 119–125
- Goldenfeld, N.; Kadanoff, L. (1999): Simple lessons from complexity. In: *Science* 284(5411), S. 87–89
- Göll, E. (2020): Trends und Megatrends als Ansatz der modernen Zukunftsforschung. Entwicklung und Praxis. In: Janik, J.; Engler, S.; Wolf, M. (Hg.): *Energiewende*

- und Megatrends. Wechselwirkungen von globaler Gesellschaftsentwicklung und Nachhaltigkeit. Bielefeld, S. 45–59
- Grösser, S. (2015): Definition: Dynamische Komplexität. Gabler Wirtschaftslexikon, 14.2.2018, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/dynamische-komplexitaet-54122> (9.1.2024)
- Gunderson, L.; Holling, C. (2002): Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Washington D.C.
- Hauff, M. (2022): Komplexität in den Sozialwissenschaften. In: Lutz-Bachmann, M.; Schwalbe, H. (Hg.): Komplexität – System – Evolution. Eine transdisziplinäre Forschungsperspektive. Baden-Baden, S. 93–118
- Johansen, I.; Rausand, M. (2014): Defining complexity for risk assessment of socio-technical systems: A conceptual framework. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability 228(3), S. 272–290
- Korzynietz, R.; Bierau-Delpont, F.; Moorfeld, R. (2023): Die Energiewende als Sprungbrett in ein resilientes Energiesystem. In: Wittpahl, V. (Hg.): Resilienz. Leben – Räume – Technik. Berlin/Heidelberg, S. 181–198
- Krebs, H.-A.; Hagenweiler, P. (2021): Energieresilienz und Klimaschutz. Energiesysteme, kritische Infrastrukturen und Nachhaltigkeitsziele. Wiesbaden
- Kreibich, R.; Oertel, B.; Wölk, M. (2011): Futures Studies and Future-oriented Technology Analysis Principles, Methodology and Research Questions. IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH, Berlin
- Lenz, S. (2009): Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Forschung im Bevölkerungsschutz 4, Bonn
- Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina); acatech (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften); Akademieunion (Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften) (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Wie können Blackout-Risiken begrenzt werden? München u. a. O.
- Linkov, I.; Bridges, T.; Creutzig, F.; Decker, J.; Fox-Lent, C.; Kröger, W.; Lambert, J.; Levermann, A.; Montreuil, B.; Nathwani, J.; Nyer, R. et al. (2014): Changing the resilience paradigm. In: Nature Climate Change 4(6), S. 407–409
- Luderer, G.; Bartels, F.; Blesl, M.; Burkhardt, A.; Edenhofer, O.; Fahl, U.; Gillich, A.; Herbst, A.; Hufendiek, K.; Kaiser, M.; Kittel, L.; Koller, F.; Kost, C. et al. (2022): Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise: Wie sich Klimaschutz und Energie- souveränität vereinen lassen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
- Lutz-Bachmann, M. (2022): Komplexität sozialer Systeme. Philosophische Überlegungen im Anschluss an die Systemtheorie von Niklas Luhmann. In: Lutz-Bachmann, M.; Schwalbe, H. (Hg.): Komplexität – System – Evolution. Eine transdisziplinäre Forschungsperspektive. Baden-Baden, S. 119–145
- Mentges, A.; Halekotte, L.; Schneider, M.; Demmer, T.; Lichte, D. (2023): A resilience glossary shaped by context: Reviewing resilience-related terms for critical infrastructures. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2302/2302.04524.pdf> (9.1.2024)
- Merten, F.; Scholz, A. (2023): Wasserstoff in der Energieversorgung und mögliche Importabhängigkeiten. In: Ökologisches Wirtschaften 38(2), S. 18–20
- Mitchell, M. (2009): Complexity: A Guided Tour. New York
- Monstadt, J.; Schmidt, M. (2019): Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities. In: Urban Studies 56(11), S. 2353–2371
- Möst, D.; Lorenz, L.; Glynnos, D. (2023): Versorgungssicherheit braucht Diversifizierung. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 47(3), S. 20–25



- MPS (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung) (o.J.): Was ist ein Sonnensturm und wie entsteht er? <https://www.mps.mpg.de/sonnenstuerme-sonnenaktivitaet-faq/1> (12.1.2024)
- Müggenburg, J. (2019): Kybernetik. In: Liggieri, K.; Müller, O. (Hg.): Mensch-Maschine-Interaktion. Handbuch zu Geschichte – Kultur – Ethik. Berlin, S. 280–282
- Naisbitt, J.; Aburdene, P. (1992): Megatrends 2000. Zehn Perspektiven für den Weg ins nächste Jahrtausend. Düsseldorf
- Nielsen, C.; Larsen, P.; Fitzgerald, J.; Woodcock, J.; Peleska, J. (2015): Systems of Systems Engineering: Basic Concepts, Model-Based Techniques, and Research Directions. In: ACM Computing Survey 48(2), S. 1–41
- Niet, I.; van den Berghe, L.; van Est, R. (2023): Societal impacts of AI integration in the EU electricity market: The Dutch case. In: Technological Forecasting and Social Change 192, Art. 122554
- OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) (2003): Emerging Risks in the 21st Century. An Agenda for Action. Paris
- Olsson, L.; Jerneck, A.; Thoren, H.; Persson, J.; O'Byrne, D. (2015): Why resilience is unappealing to social science: Theoretical and empirical investigations of the scientific use of resilience. In: Science advances 1(4), Art. 1400217
- Page, S. (2015): What Sociologists Should Know About Complexity. In: Annual Review of Sociology 41, S. 21–41
- Perrow, C. (1984): Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies. Princeton
- Postma, A.; Papp, B. (2021): Of trends and trend pyramids. In: Journal of Tourism Futures 7(2), S. 162–167
- Prognos (2022): 10. Monitoring der Energiewende. <https://www.prognos.com/de/projekt/10-monitoring-der-energiewende> (11.1.2024)
- Renn, O. (2019): Gefühlte Wahrheiten. Orientierung in Zeiten postfaktischer Verunsicherung. Leverkusen
- Renn, O.; Keil, F. (2008): Systemische Risiken: Versuch einer Charakterisierung. In: GAIA 17(4), S. 349–354
- Renn, O.; Laubichler, M.; Lucas, K.; Kröger, W.; Schanze, J.; Scholz, R.; Schweizer, P.-J. (2022): Systemic Risks from Different Perspectives. In: Risk Analysis 42(9), S. 1902–1920
- Rudloff, B. (2022): Wirtschaftliche Resilienz: Kompass oder Catchword? Welche Fallstricke und Folgeeffekte die EU im Krisenmanagement beachten muss. Stiftung Wissenschaft und Politik, SWP-Studie 1, Berlin
- Schweizer, P.-J. (2023): Transdisziplinäre Governance systemischer Risiken. In: Sonnberger, M.; Bleicher, A.; Groß, M. (Hg.): Handbuch Umweltsoziologie. Wiesbaden, S. 1–16
- Schweizer, P.-J.; Renn, O. (2019a): Governance of systemic risks for disaster prevention and mitigation. In: Disaster Prevention and Management 28(6), S. 862–874
- Schweizer, P.-J.; Renn, O. (2019b): Systemische Risiken und Transformationsprozesse auf dem Weg zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Gesellschaftsentwicklung. In: Englert, M.; Ternès, A. (Hg.): Nachhaltiges Management. Nachhaltigkeit als exzellenter Managementansatz entwickeln. Berlin, S. 211–227
- Statista (o.J.): Strombedarf von E-Autos in Europa bis 2030. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1409123/umfrage/strombedarf-e-autos-europa/> (12.1.2024)
- Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A.; Henning, H.-M. (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

- Strauß, B.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien
- Strauß, S.; Krieger-Lamina, J. (2017): Digitaler Stillstand. Die Verletzlichkeit der digital vernetzten Gesellschaft – Kritische Infrastrukturen und Systemperspektiven. Institut für Technikfolgen-Abschätzung, Wien
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2010): Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung. (Petermann, T.; Bradke, H.; Lüllmann, A.; Poetzsch, M.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 141, Berlin
- TAB (2024): Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken. (Behrendt, S.; Evers-Wölk, M.; Kollosche, I.; Revermann, C.; Sauter, A.; Sonk, M.; Thomas, D.; Uhl, A.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 209, Berlin (im Erscheinen)
- Tapia, M.; Thier, P.; Gößling-Reisemann, S. (2020): Building resilient cyber-physical power systems: An approach using vulnerability assessment and resilience. In: TATuP 29(1), S. 23–29
- UBA (Umweltbundesamt) (o.J.a): Anpassung: Handlungsfeld Energiewirtschaft. 11.1.2022, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeld-energiewirtschaft> (12.1.2024)
- UBA (o.J.b): Kraftwerke: konventionelle und erneuerbare Energieträger. 22.3.2023, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraftwerke-konventionelle-erneuerbare#kraftwerkstandorte-in-deutschland> (12.1.2024)
- UBA (o.J.c): Netzausbau. 2.8.2023, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/netzausbau#Netzausbau> (12.1.2024)
- UBA (o.J.d): Primärenergiegewinnung und -importe. 16.12.2022, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe> (12.1.2024)
- UNDP (United Nations Development Programme) (2022): UNDP RBAP: Foresight Playbook. [https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-07/UNDP-RBAP-Foresight-Playbook-Appendix-2022\\_0.pdf](https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-07/UNDP-RBAP-Foresight-Playbook-Appendix-2022_0.pdf) (11.1.2024)
- UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (o.J.): Resilience. <https://www.unrr.org/terminology/resilience> (9.1.2024)
- VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.) (2023): Neue VDE Studie: Mit Automatisierung der Stromverteilnetze erneuerbare Energien schneller und zuverlässiger integrieren. <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/vde-studie-etg-hochautomatisierung-stromnetze-energie> (12.1.2024)
- ZfK (Zeitung für kommunale Wirtschaft) (2023a): Gasag optimiert Wärmeerzeugung mit KI. <https://www.zfk.de/energie/waerme/gasag-optimiert-waermeerzeugung-mit-ki> (12.1.2024)
- ZfK (2023b): IEA: deutliche Veränderungen im Energiesektor bis 2030. <https://www.zfk.de/unternehmen/nachrichten/iea-deutliche-veraenderungen-im-energiesektor-bis-2030> (12.1.2024)
- Zio, E. (2016): Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. In: Reliability Engineering & System Safety 152, S. 137–150
- Zukunftsbüro des BMBF (2022): voraus:schau! I-III. Runde: 112 Themen. [https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/112\\_Themenbl%C3%A4tter.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/112_Themenbl%C3%A4tter.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (9.1.2024)

^>  
v



---

## 7 Abbildungen

Abb. 2.1 Unterschied zwischen komplexen und komplizierten Systemen	10
Abb. 2.2 Kritische Infrastrukturen	11
Abb. 4.1 Quellen, Umwandlung/Speicherung und Verbrauch von Energie	27



BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG  
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Karlsruher Institut für Technologie

Neue Schönhauser Straße 10  
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0  
E-Mail: [buero@tab-beim-bundestag.de](mailto:buero@tab-beim-bundestag.de)  
Web: [www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de)  
Twitter: @TABundestag

# Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren Luftverkehr



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



## **Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren 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](mailto:buero@tab-beim-bundestag.de)  
Web: [www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de)

2024

Gestaltung: VDI/VDE-IT

Umschlagbild: xx

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.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>13</b>
<b>2 Aktuelle und künftige Entwicklungen des Luftverkehrs .....</b>	<b>15</b>
2.1 Begriffsverständnis und Fokus der Folgenabschätzung .....	15
2.2 Die Klimawirkung der Luftfahrt .....	16
2.3 Zukünftige Entwicklungen der Luftfahrt .....	18
<b>3 Politischer Rahmen .....</b>	<b>21</b>
3.1 Bestandteile politischer Rahmenbedingungen .....	21
3.2 Politische Zielsetzungen und Strategien für eine klimaneutrale Luftfahrt .....	22
3.2.1 Aktivitäten der deutschen Bundesregierung .....	23
3.2.2 Aktivitäten der Europäischen Union .....	25
3.2.3 Internationale Aktivitäten .....	28
<b>4 Innovationssystem der deutschen Luftfahrt .....</b>	<b>31</b>
4.1 Technologieförderung der Luftfahrt in Deutschland .....	31
4.2 Hot Spots der Luftfahrtindustrie in Deutschland: Zahlen und Fakten zu Beschäftigten und Schwerpunkten .....	33
4.3 Die wichtigsten Clusterinitiativen im Kontext klimaneutrales Fliegen im Überblick ...	33
<b>5 Innovationsbereiche .....</b>	<b>37</b>
5.1 Technologiemapping .....	37
5.1.1 Publikationsanalyse .....	37
5.1.2 Europäische Innovationsförderung .....	39
5.2 Innovative Kraftstoffe .....	44
5.2.1 Biokraftstoffe .....	44
5.2.2 E-Fuels .....	46
5.2.3 Wasserstoff .....	47
5.3 Innovative Antriebskonzepte .....	48
5.4 Weitere Innovationsbereiche .....	50
<b>6 Klimaneutrale Luftfahrt in Deutschland .....</b>	<b>55</b>
6.1 Technologiemix für die Zukunft .....	55
6.2 Treiber und Barrieren für eine klimaneutrale Luftfahrt .....	57
6.2.1 Gesellschaft .....	57
6.2.2 Wirtschaft .....	62
6.2.3 Umwelt .....	64
6.2.4 Politik .....	66
6.3 Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems .....	68
<b>7 Handlungsfelder .....</b>	<b>71</b>
7.1 Kurzfristig realisierbare Maßnahmen mit großer Wirkung .....	71
7.2 Mittel- und langfristige Weichenstellungen .....	72
<b>8 Literatur .....</b>	<b>75</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>87</b>
9.1 Interviewpartner/innen, beteiligte Expert/innen .....	87
9.2 Abbildungsverzeichnis .....	87
9.3 Tabellenverzeichnis .....	88
9.4 Abkürzungsverzeichnis .....	88



# 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 CO<sub>2</sub>- und Nicht-CO<sub>2</sub>-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 FuE-Aktivitäten 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, Unterstützung 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 sowohl im Passagier- als auch im 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den internationalen Luftverkehr von und nach Deutschland und 0,33 % durch den inländischen Luftverkehr verursacht. Rund 1,5 % der gesamten, seit 1940 durch Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auf die Luftfahrt zurückzuführen. Allerdings steht CO<sub>2</sub> nur für rund ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs. Die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte – Rußpartikel, Wasserdampf, Schwefel- und Stickoxide (NO<sub>x</sub>), 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 CO<sub>2</sub> als am stärksten einzuschätzen. Die Klimawirkung variiert zudem in Abhängigkeit von den zurückgelegten Strecken, den Reiseflughöhen sowie den eingesetzten Flugzeugen.

Historisch betrachtet sind sowohl der Passagier- wie auch der 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. Im Jahr 2050 könnten bereits 60 % mehr CO<sub>2</sub>-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 (engl. International Civil Aviation Organization, ICAO) und der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (engl. 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 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.

### *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 im Jahr 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 in den Jahren 2016 bis 2020 relativ konstant bei rund 150 Mio. Euro befunden hat und seit 2021 ein deutlicher Anstieg auf rund 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, 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 (engl. Sustainable Aviation Fuels; SAF) sind nicht auf Erdöl basierende Kraftstoffe, die als Kerosinalternativen entwickelt werden, um die CO<sub>2</sub>-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 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.

Elektrotreibstoffe (engl. 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 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in synthetische Kraftstoffe hergestellt (Power-to-Liquid-Verfahren). 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 Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) in Wasser (H<sub>2</sub>O) 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 Düsentriebwerke 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 oben diskutierten Antriebstechnologien gehören die potenzielle Reduzierung von TGH-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.

Darüber hinaus spielt die Optimierung des Flugbetriebs eine wesentliche Rolle. So könnten beispielsweise nicht nur die hohen Kraftstoffkosten von E-Fuels abgefedert und die spezifischen CO<sub>2</sub>-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 Flügel spitzen (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 (ATM, Air Traffic Management) 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 fortgeschrittenen 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 (digitaler 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-CO<sub>2</sub>-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 vergleichsweisen 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.

Tab. 1: Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems

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

Eigene Darstellung

#### *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 & Claim-Konzepte, also Zertifikate für die Nutzung von SAF, die Fluggesellschaften erwerben können, unterstützt werden. Die Wertschöpfungs- bzw. Lieferkette von SAF könnte 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.

Kurzfristig könnten die bestehenden Netzwerke von Innovationstreibern durch die Technologieförderung, insbesondere im Rahmen des 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 Deutschland eine erhebliche Zunahme der durchgeföhrten 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 sowohl über eine Besteuerung bzw. den Emissionshandel als auch 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 darüberhinausgehende 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 Expert/inneninterviews 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 Expert/innenworkshop diskutiert, validiert und ergänzt. Danach konnte der Zuschnitt der zentralen politischen Handlungsfelder ermittelt werden. Ergänzt um Ergebnisse 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 umfasst das einleitende 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) behandelt. Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit neuen Entwicklungen ist ein Technologiemarketing, 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 Technologiemarketing 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 Entscheidern/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. 1).

## 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 sowohl im Passagier- als auch im 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.

### 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 (HAW 2021, S. 31). Von Net Zero (Nettonull) kann gesprochen werden, wenn die Klimawirkungen der CO<sub>2</sub>- und Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte nicht nur reduziert, sondern auch kompensiert und aktiv entfernt werden (Hoet 2020). 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 zum Beispiel Lärm oder soziale Aspekte, außen vor (DLR 2021a, S. 10).

Ähnlich verhält es sich mit dem Begriff der *umweltverträglichen* Luftfahrt, die nicht nur CO<sub>2</sub>-Emissionen und Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte umfasst, sondern auch weitere, die Umwelt schädigende Faktoren, wie etwa Lärm, Flächenverbrauch, Wasserbedarf etc. (HAW 2021, S. 31). Der Begriff *klimaverträgliche* bzw. *klimafreundliche* Luftfahrt wiederum umfasst daher nur diejenigen Faktoren, die auf das Klima wirken, also die CO<sub>2</sub>- und Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine *klimaverträgliche* Luftfahrt ist nicht auf einen absoluten Nullwert der Emissionen ausgerichtet (DLR 2021a, 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 Datenverfügbarkeit<sup>1</sup> 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 e. V. 2020b). Diese Ansätze werden an geeigneten Stellen im Rahmen der Analyse aufgegriffen.

---

<sup>1</sup> Der Nachhaltigkeitsbericht der Bundeswehr gibt beispielsweise an, dass im Jahr 2021 der Anteil der im Verkehrssektor ermittelten Emissionen i. H. v. 148 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bei rd. 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 im Jahr 2018), was in der wachsenden Aufgabenerfüllung der Luftwaffe begründet ist (BMVg 2022, S. 22). Auch wird in der Verantwortung des Verteidigungsministeriums Forschung zur Nutzbarkeit synthetischer Kraftstoffe im militärischen Kontext vorangetrieben (BMVg 2022, S. 23 f.).

## 2.2 Die Klimawirkung der Luftfahrt

Die Verbrennung von Flugzeugtreibstoff, überwiegend Kerosin, erzeugt CO<sub>2</sub> (Bopst et al. 2019b, S. 16). In der Atmosphäre sorgt CO<sub>2</sub> dafür, dass ein Teil der von der Erde in den Weltraum abgegebenen Wärme absorbiert und reflektiert wird (Wagener 2019). CO<sub>2</sub> hat somit einen *direkten Effekt* auf das Klima, der zudem noch weltweit wirkt und sehr lange andauern kann, da CO<sub>2</sub> über Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben kann (Öko-Institut e. V. o. J.). Eine Betrachtung der historischen Entwicklung zeigt zudem, dass zwischen 1940 und 2018 rund 1,5 % der gesamten durch Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-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 weltweite Luftfahrt trägt zur anthropogenen Klimaerwärmung bei. Maßgeblich verantwortlich für die menschengemachte Klimaerwärmung ist laut dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (IPCC 2023). Aktuell ist die durchschnittliche Temperatur um ca. 1,1 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter erhöht (IPCC 2023, S. 6). Die internationale Luftfahrt (Aviation) 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 rd. 1.035 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2019. Im Zuge der COVID-19-Pandemie kam es insbesondere 2020 zu einem dramatischen Rückgang der Emissionen aufgrund der weltweiten Einstellung des Flugverkehrs. Jedoch wurden bereits 2021 wieder rd. 720 Mio. t CO<sub>2</sub> ausgestoßen (Hyeji/Teter). Im Jahr 2023 wurde zudem die bislang höchste Anzahl an Flügen<sup>2</sup> 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 Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen). Bis zum coronabedingten Einbruch im Jahr 2020 sind diese Emissionen in Europa 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den internationalen Luftverkehr von und nach Deutschland und 0,33 % durch den inländischen Luftverkehr (BDL 2022a; Öko-Institut e. V. S. 10) verursacht wurden.

Allerdings steht CO<sub>2</sub> nur für rund ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs (Lee et al. 2021). Die Nicht-CO<sub>2</sub>-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 (NO<sub>x</sub>), 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 CO<sub>2</sub>) und Lachgas (256-fache Klimawirkung von CO<sub>2</sub>) (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 einen wärmenden Effekt. Stickoxide können auch dazu beitragen, dass der Methangehalt der Atmosphäre zurückgeht. Dadurch entsteht ein kühlernder 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<sup>3</sup> (Öko-Institut e. V. o. J.). Die Effekte von Kondensstreifen und Zirruswolken sind neben denen von CO<sub>2</sub> als am stärksten einzuschätzen, denn auch Wolkenbildung kann zur Erwärmung beitragen. Im Gegensatz zu den Effekten von CO<sub>2</sub> ist die Wirkung von Kondensstreifen und Zirruswolken zeitlich und örtlich stärker begrenzt (Öko-Institut e. V.

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> <https://www.adv.aero/randomizer/schwefeldioxid-so2/> (27.11.2023)

o. J.). Die Stärke dieser Klimawirkung lässt sich gegenwärtig noch nicht genau quantifizieren und dürfte unterschiedlich stark ausfallen, je nachdem, ob Inlandsflüge oder Langstreckenflüge betrachtet werden (UBA 2020, S. 62).

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 e. V. o. J.). Tab. 2 gibt einen Überblick über unterschiedliche Effekte, deren Dauer und geografische Verteilung.

Während die Wirkung von CO<sub>2</sub> gegenwärtig wissenschaftlich fundiert nachvollzogen werden kann, sind die unterschiedlichen Wirkungen der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte noch nicht in Gänze verstanden (Interview Scholz; Bopst et al. 2019b; Gössling/Humpe 2020).

Tab. 2: Klimawirkungen der Luftfahrt

Klima-faktoren	CO <sub>2</sub>	NOx → Ozon (O <sub>3</sub> ) Anstieg	NOx → Methan (CH <sub>4</sub> ) Senkung	NOx → Ozon (O <sub>3</sub> ) Senkung	Sulfat Aero-sole	Ruß	Kondens-streifen & Zirruswolken
<b>Klima-wirkung</b>	erwärmend	erwärmend	abkühlend	abkühlend	abkühlend	erwärmend	erwärmend
<b>Dauer</b>	Jahrhunderte	Wochen bis Monate	Dekaden	Dekaden	Tage bis Wochen	Tage bis Wochen	Kondensstreifen: Stunden Zirruswolken: Stunden bis Tage
<b>Räumliche Verbreitung</b>	global	kontinental bis global	kontinental bis global	kontinental bis global	kontinental bis global	lokal bis global	lokal bis global
<b>Wissen-schaftliche Erkenntnisse</b>	gut	mittel	mittel	mittel	direkte Effekte: gut indirekte Effekte: schlecht	direkte Effekte: gut indirekte Effekte: schlecht	schlecht

Quelle: <https://fliegen-und-klima.de/wie-wirken-flugemissionen.html> (27.11.2023) unter Verweis auf: <https://www.offsetguide.org/understanding-carbon-offsets/air-travel-climate/climate-impacts-from-aviation/total-climate-impact-from-aviation/> (27.11.2023)

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 Zehnfache höher sind als auf vergleichbaren Linienflügen<sup>4</sup> (Transport & Environment 2021, S. 35 f.).

Stellt man die zurückgelegten Strecken gegenüber, so lässt sich – wiederum aus europäischer Perspektive – feststellen, dass Kurzstrecken (< 500 km) rund 4,3 % der CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2020 wurden auf der Langstrecke verursacht, 51 % auf Kurz- und Mittelstrecken und 7 % von Regionalflügen<sup>5</sup> (Kirchgeßner 2022).

Verglichen mit anderen Verkehrsträgern wie dem Pkw, der für ca. 18 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen (EP

<sup>4</sup> Vergleichsmaßstab ist g CO<sub>2</sub> pro Personenkilometer auf einer Strecke von 500 km.

<sup>5</sup> 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. Ein Überblick über andere Klassifizierungen bietet [https://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_length\\_\(19.09.2023\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_length_(19.09.2023))

2019). Setzt man allerdings die Emissionen in Bezug zu der Verkehrsleistung, zeigt sich beispielsweise für Deutschland, dass ein Inlandsflug rund 60 % mehr Emissionen verursacht als die Fahrt mit einem Pkw<sup>6</sup>.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die Klimawirkung der Luftfahrt besteht darin, dass der Ausstoß von CO<sub>2</sub> sowie weiteren Gasen und Partikeln, den Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten, insgesamt zu einer Erwärmung der Atmosphäre beiträgt. Der Anteil liegt zwischen ca. 3 bis 5 %, wenn man die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte mitberücksichtigt. Die Wirkung variiert dabei u. a. in Abhängigkeit von Flugstrecken sowie Flugzeugtypen. 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<sup>7</sup> (PKM) ab, die in den vergangenen fünfzig Jahren kontinuierlich angestiegen sind.

Seit Ende der 1970er Jahre sind die Passagierzahlen um das knapp Fünfzehnfache gestiegen, von rund 310 Mio. auf 4,46 Mrd. Flugreisende im Jahr 2019.<sup>8</sup> Nach dem COVID-19-bedingten Einbruch im Jahr 2020 (1,77 Mrd. Passagiere) ist die Zahl im Jahr 2021 bereits wieder bei rund 50 % des vorpandemischen Niveaus angekommen (2,28 Mrd. Passagiere).<sup>9</sup>

Zwischen 2014 und 2019 stieg zudem die Anzahl der durchgeführten Flüge<sup>10</sup> kontinuierlich an, von 33 Mio. Flügen auf 38,9 Mio. Flüge in 2019 (IATA 2022). Nach dem COVID-19-bedingten Einbruch sind die Zahlen wieder kontinuierlich gestiegen und lagen 2022 wieder bei rund 27,9 Mio. Flügen. Für das Jahr 2023 wird geschätzt, dass in etwa das Niveau von 2014 erreicht wird (airliners.de 2021; Ascend 2023; IATA 2022).

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 2023c). Gemessen in Frachttonnenkilometern<sup>11</sup> wurden 2014<sup>12</sup> 209.877 Mio. FTK geleistet, 2021 ca. 285.434 Mio. FTK. Das bedeutet einen Anstieg um ca. 36 % (Boeing 2022c, S. 113; DFS 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 2022b).

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).

<sup>6</sup> <https://fliegen-und-klima.de/verkehrsmittel-im-vergleich.html> (19.09.2023)

<sup>7</sup> Maßeinheit für die Beförderung eines Fluggastes über eine Strecke von einem Kilometer

<sup>8</sup> <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR> (19.09.2023)

<sup>9</sup> <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR> (19.09.2023)

<sup>10</sup> Verschiedene Quellen kommen hier zu unterschiedlichen Aussagen: Statista.de geht 2014 von 36,9 Mio. Flügen aus; Weltbank, Statista.com (unter Berufung auf die International Air Transport Association IATA) gehen von 33,02 Mio. Flügen aus. Siehe außerdem: <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.DPRT> (20.09.2023).

<sup>11</sup> Frachttonnenkilometer (FTK) ist – analog zu Personenkilometer – eine Leistungseinheit, die angibt, wie viel Fracht (in Tonnen) über welche Strecke befördert worden ist. Näher unterschieden werden kann noch zwischen angebotener Leistung und tatsächlich beförderter Leistung.

<sup>12</sup> Frühere Zahlen liegen nicht vor.

### *Entwicklung in Deutschland*

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

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

Die innerdeutsche Luftfahrt in Deutschland hat einen Anteil zwischen 5 und 6 % an der im Personenverkehr erbrachten Verkehrsleistung<sup>13</sup> (Statista GmbH 2022b, S. 16). Es wurden ca. 10 Mrd. PKM<sup>14</sup> 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 (0,3 % im Jahr 2021 [Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) 2023]) verglichen mit rund 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 mit 5,3 Mio. t im Jahr 2021 einen vorläufigen Höhepunkt, ehe es 2022 einen Rückgang auf 4,9 Mio. t gab (Statista GmbH 2022a, S. 25). Das beförderte Volumen könnte bis zum Jahr 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 sowie Szenarien<sup>15</sup> (siehe unten) auf ein anhaltendes Wachstum der globalen Luftfahrt in den nächsten Jahrzehnten hin.

Im Jahr 2018 schätzte die International Air Transport Association (IATA), dass sich die Anzahl der weltweiten Flugpassagiere innerhalb eines Zeitraums von 20 Jahren mehr als verdoppeln würde, von rd. 4 Mrd. im Jahr 2017 auf 8,2 Mrd. Passagiere im Jahr 2037 (IATA 2018). Nicht nur das Passagieraufkommen soll steigen, auch die Verkehrsleistung ist durch einen kontinuierlichen Anstieg gekennzeichnet. Ebenfalls 2018 rechneten die Luftfahrtunternehmen 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 im Jahr 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 darauf folgenden Jahren wieder an (siehe oben), sondern auch die unter dem Eindruck dieses Einbruchs entwickelten Prognosen sahen weiterhin einen stetigen Anstieg vor (Gelhausen et al. 2021, S. 2). Im Jahr 2022 schätzte das Luftfahrtunternehmen Boeing in einer Marktanalyse, dass die Verkehrsleistung sich bis 2041 annähernd verdoppeln würde und auf rd. 20 Mrd. PKM steigen könnte (Boeing 2022a). Damit bewegt sich diese Schätzung in einer vergleichbaren Größenordnung wie diejenigen, die vor Auftreten der COVID-19-Pandemie erstellt wurden.<sup>16</sup>

<sup>13</sup> Verkehrsleistung wird in PKM ausgedrückt, das Verkehrsraufkommen anhand der Anzahl der Passagiere bemessen.

<sup>14</sup> Start und Ziel in Deutschland

<sup>15</sup> Insbesondere Betrachtungen der Entwicklungen bis zum Jahr 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 Michelmann et al. 2023; ATAG 2021; DLR 2021b; Eurocontrol 2022; Graver et al. 2022. Eine Gegenüberstellung verschiedener Szenarien und Prognosen ist beispielsweise verfügbar bei Graver 2022.

<sup>16</sup> Anmerkung: Ein Großteil der verwendeten Quellen basiert auf Daten und Annahmen, die vor dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine erhoben bzw. getroffen worden sind. Dementsprechend sind die Effekte, die aus der andauernden (Stand 1.11.2023) kriegerischen Auseinandersetzung auf die weltweite Luftfahrt resultieren, nur schwer einschätzbar.

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. (p. a. 2,8 %) bis 16,9 Mrd. (p. a. 3,5 %) PKM (Gelhausen et al. 2021, S. 10 ff.). Weltweit würden dann im Jahr 2050, der Zielmarke für eine klimaneutrale Luftfahrt, bereits 10 Mrd. Passagiere jährlich unterwegs sein (ATAG 2021, S. 21 f.). Dabei soll das größte Wachstum<sup>17</sup> 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.

In Europa könnten im Jahr 2050 zwischen 13,2 Mio. und 19,6 Mio. Flüge jährlich stattfinden, was im Durchschnitt ein jährliches Wachstum von 1,2 %, ausgehend vom Jahr 2019 (11,1 Mio. Flüge), bedeutet. Davon sollen ca. 88 % der Flüge Passagierflüge sein (1,1 % Wachstum p. a.), 5 % Frachtflüge (2,9 % Wachstum p. a.) und 7 % Geschäftsreisen (1,4 % Wachstum p. a.) (Eurocontrol 2022, S. 10). Insbesondere zunehmen soll die Zahl der Langstreckenflüge, wodurch rd. 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). Im Jahr 2042 könnten bereits knapp 47.000 Flugzeuge, davon ca. 40.000 neue Flugzeuge, weltweit im Einsatz sein (Airbus 2023b, 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 zukünftig ausüben könnte, lässt sich dies beispielsweise über den Kraftstoffverbrauch nachvollziehen. Dieser steigt angesichts der oben genannten Entwicklung schätzungsweise jährlich um ca. 3,5 % an, wobei pro Kilogramm verbranntem Treibstoff ca. 3,16 kg CO<sub>2</sub>, 1,23 kg Wasserdampf, 15,14 g Stickoxide, 1,2 g Schwefeloxide und 0,03 g Ruß ausgestoßen werden (HAW 2021, S. 29; Klöwer et al. 2021, S. 2). Dementsprechend steigen mit der Zunahme der weltweiten Luftfahrt auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen, ebenso wie die zuvor genannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte. 2040 könnte die globale Flugzeugflotte 390 Mio. t Treibstoff verbrauchen, verbunden mit einem entsprechenden Ausstoß von THG-Emissionen (IEA 2019).<sup>18</sup> 2050 könnte der Verbrauch bei 500 Mio. t liegen (ICAO 2022a, S. 26). Dabei soll der Kerosinverbrauch verglichen mit dem Jahr 2015 um das 2,4- bis 3,8-fache steigen (Öko-Institut e. V. 2020b, S. 3). Ohne entsprechende Maßnahmen würde die Luftfahrt also im Jahr 2050 ca. 1.600 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen ausstoßen (ICAO 2022a, S. 28), ein Anstieg um ca. 60 % verglichen mit dem Jahr 2019 (siehe oben). Hinzu kommen die oben genannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte in der entsprechenden Größenordnung.

<sup>17</sup> Die in der zitierten Quelle dargestellte Entwicklung basierte auf Daten des Jahres 2019, lässt also die Effekte der COVID-19-Pandemie außen vor.

<sup>18</sup> 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 Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (engl. International Civil Aviation Organization, ICAO) und der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (engl. 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 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.

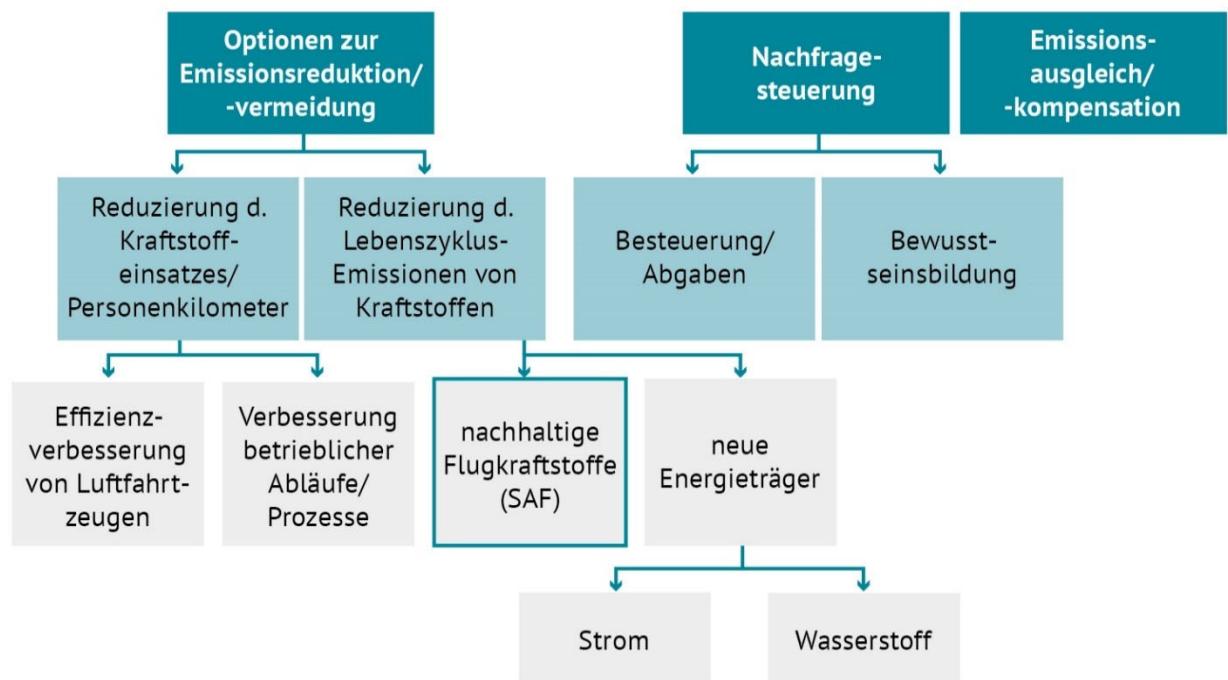
#### 3.1 Bestandteile politischer Rahmenbedingungen

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 CO<sub>2</sub>-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“ (Zentrum Liberale Moderne 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.<sup>19</sup> Dabei stimmt der Großteil der Akteure grundsätzlich überein, dass ohne nachhaltige Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte – als zentrale Stellschrauben in einem umfangreichen Maßnahmenbündel (ICAO 2022b) – die Gestaltung eines klimaneutralen Luftverkehrs nicht möglich sein wird.

Bezogen auf die verschiedenen politischen Ansatzpunkte (einen Überblick über verschiedene Optionen bietet Abb. 1) 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.

<sup>19</sup> Als „Carbon Leakage“ wird die Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen (etwa durch die Verlagerung treibhausgasemittierender Industrien) in Länder außerhalb der Europäischen Union bezeichnet, um die strengeren europäischen Auflagen für Treibhausgasemissionen zu umgehen: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20210303STO99110/carbon-leakage-unternehmen-daran-hindern-emissionsvorschriften-zu-umgehen> (27.11.2023)

Abb. 1: Optionen zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt



Quelle: (Bauhaus Luftfahrt 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 (Zentrum Liberale Moderne 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 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 (BReg 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-Klimaschutzgesetz (KSG)<sup>20</sup>, das zur Klimaneutralität bis zum Jahr 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 KSG im Verkehrssektor subsumiert. Als Zielvorgabe für den Verkehrssektor insgesamt sollen

<sup>20</sup> Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist. BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz), <https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz> (20.10.2023)

bis zum Jahr 2030 die CO<sub>2</sub>-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 sind nur ca. 6 % der Emissionen aus dem deutschen Luftverkehr insgesamt auf innerdeutsche Flüge zurückzuführen; 94 % entstehen durch Flüge (inkl. Tankvorgänge) in andere Länder, davon ca. ein Viertel durch Flüge in andere EU-Staaten (Siemons et al. 2021, S.4), was die Bedeutung von europäischen bzw. internationalen Regelungen unterstreicht.

Die Europäische Union hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen und bis zum Jahr 2030 mindestens 55 % der Treibhausgase – im Vergleich zum Stand im Jahr 1990 – einzusparen. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene „Fit für 55“-Maßnahmenpakete entwickelt. Beispielsweise wird angestrebt, den Ausbau erneuerbarer Energien-Kapazitäten deutlich zu beschleunigen, um im Jahr 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-Kommision, EU-Rat und EU-Parlament auf verschiedene Maßnahmen geeinigt, die insbesondere den EU-Emissionshandel verschärfen und die Nutzung von nachhaltigen Flugkraftstoffen (engl. Sustainable Aviation Fuels, SAF)<sup>21</sup> anreizen sollen (Rat der Europäischen Union 2023a; Scheelhaase et al. 2023).

Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation der Vereinten Nationen (ICAO) hat 2022 für ihren Geltungsbereich das Ziel beschlossen, bis zum Jahr 2050 netto keine CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr auszustoßen (ICCT 2023). Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte werden darin allerdings nicht berücksichtigt. Ebenfalls sind keine Meilensteine, 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-neutralen strombasierten Flugkraftstoffen sowie für Forschung, Entwicklung und Flottenmodernisierung im Luftverkehr“ eingesetzt werden sollen und „ambitionierte Quoten für Power-to-Liquid (PtL-Quoten) im Luft- und Schiffsverkehr“ für einen raschen Markthochlauf angereizt werden sollen (SPD, B90/Grüne, FDP 2021).

Aufbauend auf dem Koalitionsvertrag, spezifiziert ein *gemeinsames Strategiepapier der Bundesregierung*<sup>22</sup> 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 (BReg 2022, S. 1). Zudem wird bekräftigt, dass auch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Luftverkehrs berücksichtigt werden müssen (BReg 2022, S. 2).

<sup>21</sup> Die SAF-Terminologie wurde von der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation (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 Bio-Jet, erneuerbarer Jet, Biokerosin, alternativer Flugkraftstoff, nicht-konventioneller Flugkraftstoff usw. 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. <https://www.caafi.org/resources/faq.html#Alternative> (27.11.2023)

<sup>22</sup> 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

Tab. 3: Vorgesehene Maßnahmen für einen Beitrag der Luftfahrt zum Klimaschutz

Maßnahme	Konkretisierung
<b>Verbesserung der Effizienz im Flugzeug und disruptive Technologien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausrichtung aller FuE-Instrumente der BReg auf Technologien, die einen Beitrag zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs bringen</li> <li>▪ Luftfahrtforschungsprogramm (Förderaufruf VI-3), fokussiert auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz</li> <li>▪ Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP): Schwerpunkt Brennstoffzellensysteme für (kleine) Flugzeuge</li> <li>▪ BMDV Innovations- und Technologiezentrum Wasserstoff (ITZ) soll am Standort Nord Leistungen für H<sub>2</sub> und Brennstoffzellenanwendungen in der Luftfahrt anbieten.</li> </ul>
<b>Markthochlauf SAF</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konsequente Umsetzung der PtL-Roadmap (insbesondere Förderung von PtL-Kerosin)</li> <li>▪ Ambitionierte Beimischungsquoten als Instrument zur Markteinführung</li> <li>▪ Fit-for-55-Dossiers mit Luftverkehrsbezug schnell auf EU-Ebene verabschieden</li> <li>▪ EU-EHS nutzen, um die Kostenlücke zwischen herkömmlichen Kraftstoffen und SAF zu schließen</li> <li>▪ Staatliche Förderung von Pilotanlagen und Demonstratoren sowie von SAF-Produktionsanlagen im industriellen Maßstab</li> <li>▪ Ausbau internationaler Lieferbeziehungen von SAF</li> <li>▪ Staatliche Förderung von PtX-Labs (BMWK)</li> </ul>
<b>Flughäfen sollen klimaneutral werden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unterstützung eines klimafreundlichen Flughafenbetriebs</li> <li>▪ Förderung klimafreundlicher Bodenstromanlagen</li> <li>▪ Unterstützung des Ausbaus der Elektromobilität auf dem Vorfeld und in Parkhäusern bzw. auf Parkplätzen</li> <li>▪ Unterstützung der Erschließung von Photovoltaik-Potenzialen an Flughäfen</li> </ul>
<b>weitere geplante Maßnahmen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bis zur europäischen Entscheidung über die Einführung einer Kerosinsteuer soll auch europaweit eine Luftverkehrsabgabe erhoben werden (wie in Deutschland).</li> <li>▪ Unterstützung der Umsetzung bzw. Erreichung europäischer und internationaler Maßnahmen und Zielsetzungen (EU-EHS, CORSIA, weitere Langfristziele für den internationalen Luftverkehr)</li> </ul>

Quelle: BReg 2022

Die folgenden inhaltlichen Schwerpunkte werden im gemeinsamen Strategiepapier genannt:

- europäische und internationale Instrumente zur CO<sub>2</sub>-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 nachhaltig erzeugten Flugkraftstoffen (Sustainable Aviation Fuels, SAF), darunter CO<sub>2</sub>-neutrale strombasierte Flugkraftstoffe (Power-to-Liquid, 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

Im Rahmen der aktuellen Finanz- und Haushaltsplanung strebt die Bundesregierung an, die in Tab. 3 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 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi] 2020; BMWK 2023a). Die PtL-Roadmap der Bundesregierung konzentriert sich dabei ausschließlich auf nachhaltige strombasierte Kraftstoffe auf Basis von grünem Wasserstoff.<sup>23</sup> 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 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV] et al. 2021). In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird unter anderem 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 im Jahr 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 (BMWK 2023a).

Zentrale Programme der Forschungs- und Entwicklungsförderung sind etwa das Luftfahrforschungsprogramm (LuFo) des BMWK sowie das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (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 Kraftstoffe sowie zur Ermöglichung des Markthochlaufs von strombasiertem Kerosin.<sup>24</sup>

### 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 Europäischen Emissionshandelssystem (EU-EHS) über den Entwurf der ReFuelEU-Aviation-Verordnung zur verpflichtenden Beimischung von nachhaltigen Flugkraftstoffen (SAF)

<sup>23</sup> Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse und der Nutzungskonkurrenz durch andere Sektoren wird Biomasse dort nicht thematisiert.

<sup>24</sup> <https://erneuerbarekraftstoffe.de/gesamtkonzept/> (27.11.2023)

sowie der Förderung der Produktion und Nutzung von SAF bis hin zur Initiative des einheitlichen europäischen Luftraums („Single European Sky“) zur Flugroutenoptimierung und weiteren betrieblichen Verbesserungen (EK (Europäische Kommission), 2021a). Auf Basis der Vorschläge der Europäischen Kommission vom Juli 2021 im Rahmen des „Fit für 55“-Pakets einigten sich Kommission, Europäischer Rat und das Europäische Parlament im Trilog auf neue bzw. verschärzte Klimaschutzregeln für den europäischen Luftverkehr. Durch die beschlossenen Regelungen werden insbesondere der europäische Emissionshandel verschärft und Anreizmaßnahmen zur Nutzung von SAF geschaffen (Rat der Europäischen Union 2023a; Scheelhaase et al. 2023).

#### *Europäischer Emissionshandel*

Der europäische Emissionshandel ist ein zentrales Instrument zur nachhaltigen Transformation des europäischen Flugverkehrs. Seit dem Jahr 2012 wird der innereuropäische Luftverkehr in den Europäischen Emissionshandel (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 Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) verursachten und verifizierten Kohlenstoffdioxid-Emissionen abgeben. Die Regelung betrifft alle Luftfahrzeugbetreiber, auch solche, die ihren Geschäftssitz außerhalb der Europäischen Union (EU) haben. Die Abgrenzung der in den EU-EHS einbezogenen Luftverkehrsemissionen legt die EU-Emissionshandelsrichtlinie fest (DEHSt 2022).

Laut Einigung von Kommission, Rat und Parlament bleibt die Begrenzung des EHS auf den europäischen Wirtschaftsraum (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 dem Jahr 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 for 55“-Pakets schlägt die EU-Kommission zudem vor, ab dem Jahr 2024 die jährliche Gesamtmenge der verfügbaren Emissionen des Flugverkehrs um 4,2 % jährlich zu senken (UBA 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-CO<sub>2</sub>-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-CO<sub>2</sub>-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-CO<sub>2</sub>-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 rechtzeitiges Umsteuern angesehen, sondern als ein zentrales Element in einem Konstrukt aus verschiedenen regulativen und fördernden politischen Maßnahmen (EK (Europäische Kommission), 2021a). Von großer Bedeutung für seine zukünftige Wirksamkeit ist dabei die erfolgreiche Einbeziehung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten bzw. die Entwicklung von ergänzenden Instrumenten für deren Bepreisung und Reduzierung (Interview Cames, Interview Grimme). Diese Einbeziehung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten in den EU-EHS gilt als komplex, da es entsprechender Berechnungsmethoden bedarf, die etwa „Trade-Offs“ zwischen

CO<sub>2</sub>- und Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten berücksichtigen – und damit die Netto-Klimawirkung. Zudem ist einzubeziehen, dass die Klimawirkung von Nicht-CO<sub>2</sub>-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 im Rahmen von „Fit für 55“ ist der Entwurf der ReFuelEU-Aviation-Verordnung, die das Ziel verfolgt, eine langfristige und verlässliche Marktentwicklung für nachhaltige Flugkraftstoffe (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 Fünfjahresschritten auf mindestens 70 % im Jahr 2050 steigen (Rat der Europäischen Union 2023b). Zudem enthält die Verordnung eine Unterquote für Kraftstoffe aus nichtbiologischen Quellen, worunter E-Fuels fallen (UBA 2021). Laut der Einigung des Trilogs vom 16. Juni 2023 soll diese Unterquote für E-Fuels ebenfalls in Fünfjahresschritten von mindestens 1,2 % 2030 auf mindestens 35 % im Jahr 2050 ansteigen (BMWK 2023b). Vormals 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 vor für jeden Flug von einem EU-Flughafen aus. Auf diese Weise soll das Tankering vermieden werden, d. h. das vermeintlich preisgünstigere Tanken außerhalb von EU-Flughäfen. Luftfahrtzeugbetreiber 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 Europäischem Rat und Parlament wurde der Kommissionsvorschlag dergestalt ergänzt, dass die Anwendung von Wasserstoff und synthetischen CO<sub>2</sub>-armen Flugkraftstoffen sowie bestimmten zertifizierten Biokraftstoffen ermöglicht wird, die konform sind mit den Nachhaltigkeits- und Emissionsreduktionskriterien der Erneuerbare-Energien-Richtlinie. Explizit ausgenommen sind Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen (Rat der Europäischen Union 2023a).

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-CO<sub>2</sub>-Effekte beitragen kann. Mit einem vorgesehenen Monitoring des Schwefel- und Aromatengehalts im Kerosin kann ermittelt werden, welchen Effekt auf das Klima ein verringelter Anteil von Schwefel und Aromaten hat. Eine verpflichtende Reduzierung dieser Anteile kann zur Verringerung der klimaschädlichen Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte beitragen (EK 2020b). Entsprechende Obergrenzen können auf Grundlage der Monitoring-Ergebnisse festgelegt werden.

#### *EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (RED)*

Die EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (RED) definiert unter anderem das Ausbauziel der EU für erneuerbare Energien. Mit der aktuellen Novelle (RED III) 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 Richtlinie unter anderem 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 2023b). Ebenfalls wird die Treibhausgasminderung definiert, die durch den Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen zu erreichen ist (BMUV et al. 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 (Zentrum Liberale Moderne 2023). Dieser „Carbon Leakage“-Effekt könnte dazu führen, dass CO<sub>2</sub>-Einsparungen europäischer Airlines durch steigende Emissionen von Nicht-EU-Airlines überkompensiert werden (Zentrum Liberale Moderne 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 gelgenden jeweiligen nationalen und europäischen umweltschutz-rechtlichen Vorschriften einzuhalten haben“ (BMUV et al. 2021, S. 8).

#### *CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)*

Da Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr nicht Teil des internationalen UNFCCC-Climate-Regimes sind, haben die Mitgliedsstaaten der International Civil Aviation Organization (ICAO) im Jahr 2016 beschlossen, ein marktbares System zur Kompensation von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr einzuführen. Der Ansatz lautet, dass Fluglinien und andere Flugzeugbetreiber alle CO<sub>2</sub>-Emissionen kompensieren, die über dem Ausgangsniveau des Jahres 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 dem Jahr 2027 soll CORSIA dann verbindlich für die Mitgliedsstaaten sein (ICAO 2022b, S. 225 ff.).

Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (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 Offset-Zertifikaten, 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 zum Jahr 2027 nicht an CORSIA teilnehmen, sollen „unabhängig davon im EU-EHS teilnahmepflichtig werden“ (EK (Europäische Kommission), 2021a; Scheelhaase et al. 2023; UBA 2021).

#### *Ausblick USA/IRA*

Im Rahmen des 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 zum Jahr 2050 sämtliche herkömmliche Flugkraftstoffe durch SAF zu ersetzen (ca. 130 Mrd. l pro Jahr). Im Jahr 2030 soll die jährliche Produktion von SAF bereits 12 Mrd. l umfassen (ICAO 2022b). Diese neue Steuergutschrift für SAF „beginnt bei 1,25 US-Dollar pro Gallone (rund 3,79 l) für nachhaltige Kraftstoffe, welche eine 50-prozentige 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 CO<sub>2</sub> durch die produzierten Kraftstoffe eingespart wird, desto höher liegt die Förderung. Auf diese Weise sollen die deutlich höheren Produktionskosten ohne Wettbewerbsverzerrung ausgeglichen werden (Zentrum Liberale Moderne 2023). Vonseiten der europäischen Industrie werden entsprechend Befürchtungen geäußert, dass eine derart 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

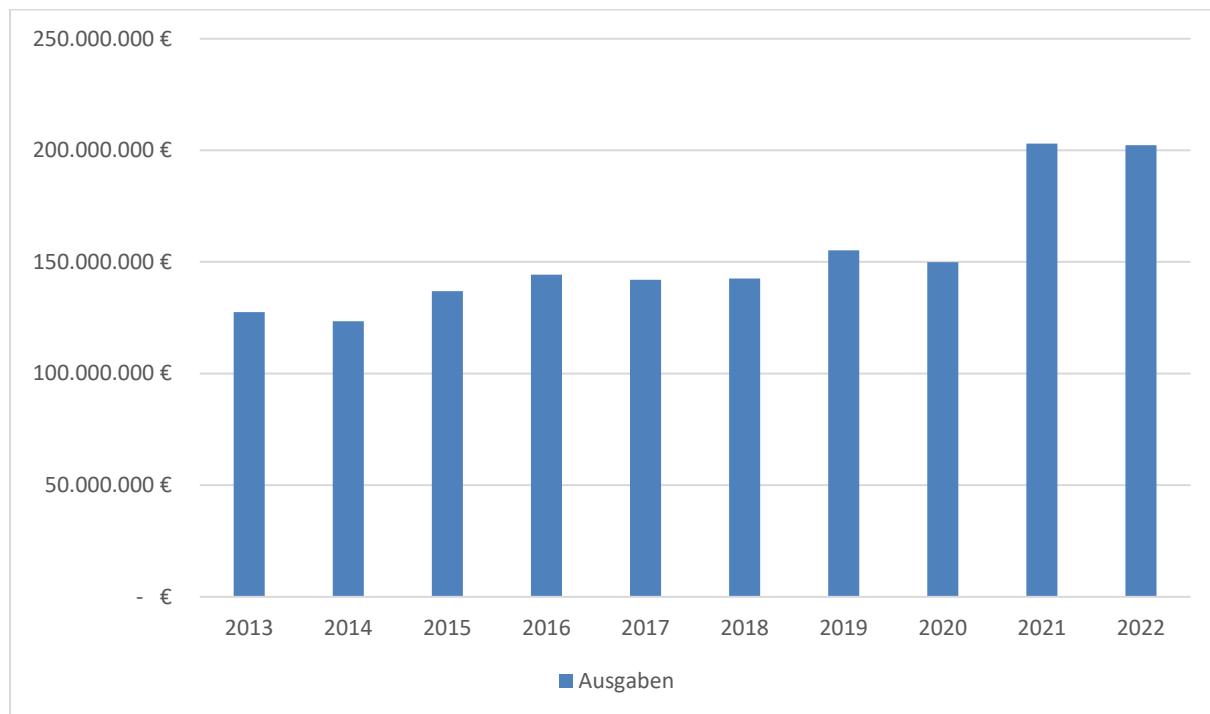
Das *Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo)* des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist das zentrale Instrument zur Förderung von Forschungs- und Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt am Standort Deutschland. Das Ziel des LuFo ist es, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie 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 Luftransportsystems der Zukunft beitragen.<sup>25</sup> 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.<sup>26</sup> 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. 2) allein des BMWK zeigt, dass sich das Niveau der Förderung in den Jahren 2016 bis 2020 relativ konstant bei rund 150 Mio. Euro befunden hat und seit 2021 ein deutlicher Anstieg auf rund 200 Mio. Euro zu verzeichnen ist.

<sup>25</sup> Siehe Programmbeschreibung des Projektträgers Luftfahrtforschung, online unter: [https://www.dlr.de/pt-lf/desktopdefault.aspx/tabid-13060/22805\\_read-53049/](https://www.dlr.de/pt-lf/desktopdefault.aspx/tabid-13060/22805_read-53049/), (15.06.2023).

<sup>26</sup> Ebd.

Abb. 2: Forschungsförderung von Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt – Förderung von Einzelvorhaben des BMWK



Quelle: Bundesministerium der Finanzen 2023<sup>27</sup>

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Studie (September 2023) lief eine **Evaluation** des LuFo, deren Ergebnisse noch nicht vorlagen.<sup>28</sup> Die letzte verfügbare Evaluation des LuFo stammt aus dem Jahr 2019 und untersuchte die Wirkungen und den Nutzen des Luftfahrtforschungsprogramms. Die Evaluation kam zu dem 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 einigen Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung des LuFo, darunter die stärkere Einbindung von KMU, die Erhöhung der Transparenz und die Intensivierung der Kommunikation sowie die Anpassung der Förderbedingungen an die Bedürfnisse der Branche (Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH 2019).

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 Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP). Das NIP konzentriert sich dabei auf die technische Machbarkeit bis hin zur Marktverfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen und Komponenten für kleine Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt. 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 Berndes/Belitz). Das BMDV Innovations- und Technologiezentrum Wasserstoff (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; BReg 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

<sup>27</sup> [www.bundeshaushalt.de](http://www.bundeshaushalt.de) (14.07.2023)

<sup>28</sup> <https://www.isg-institut.de/evaluation-des-sechsten-zivilen-luftfahrtforschungsprogramms-lufo-vi/> (19.09.2023)

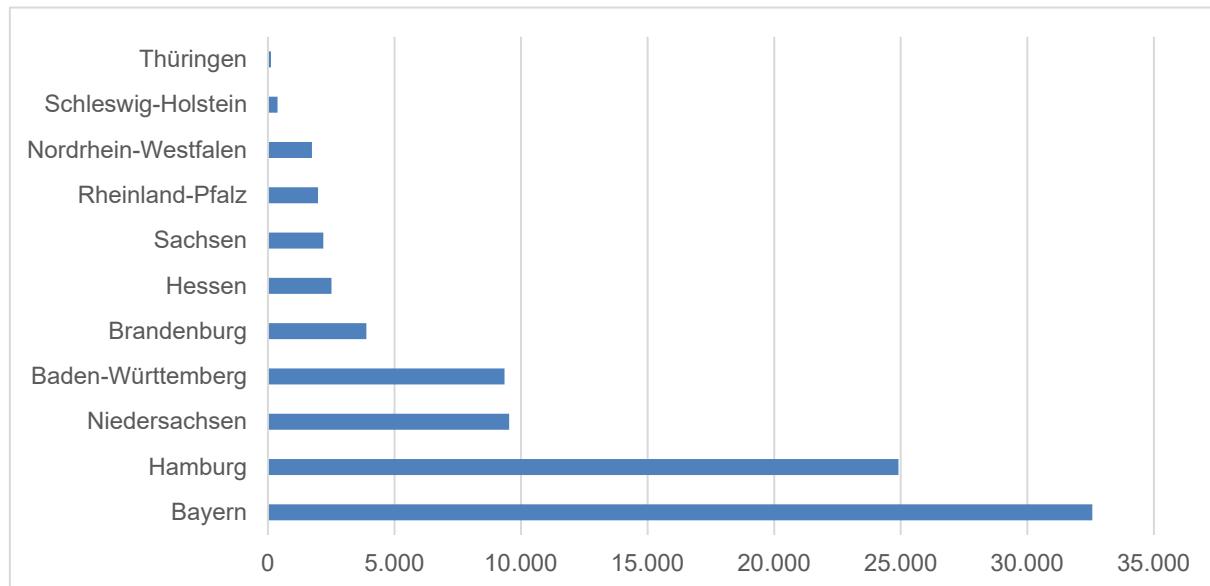
für die Luftfahrtforschung, die sich an den spezifischen Bedarfen und Stärken der jeweiligen Regionen orientieren und oft eine Ergänzung oder Voraussetzung für die Bundesförderung darstellen. Die Bundesländer kooperieren auch untereinander oder mit anderen europäischen Regionen im Rahmen von Netzwerken oder Initiativen wie zum Beispiel dem European Aerospace Cluster Partnership (EACP) oder dem Clean Sky Joint Undertaking (CSU). Die Bundesländer sind zudem an der Umsetzung der nationalen Luftfahrtstrategie beteiligt, die eine enge Abstimmung zwischen Bund, Ländern und Industrie vorsieht.

## 4.2 Hot Spots 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 rund 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). Im Jahr 2022 stiegen die Zahlen wieder an, auf ca. 73.000 Beschäftigte in der zivilen sowie 23.000 in der militärischen Luftfahrtindustrie (BDLI 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. 3).

Abb. 3: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte der Teilbranche 303 Luft- und Raumfahrzeugbau



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

## 4.3 Die wichtigsten Clusterinitiativen im Kontext klimaneutrales Fliegen 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 Abb. 4 sind die wesentlichen Clusterinitiativen in Deutschland abgebildet.

Abb. 4: Clusterinitiativen in der Luftfahrt in Deutschland



Eigene Darstellung auf Basis der Clusterplattform Deutschland ([www.clusterplattform.de](http://www.clusterplattform.de), 30.5.2023) und Informationen auf den einzelnen Seiten der Clusterinitiativen (30.05.2023)

Hamburg ist einer der weltweit führenden Standorte für die zivile Luftfahrtindustrie. Hier arbeiten mehr als 41.000 Fachkräfte in der Luftfahrt.<sup>29</sup> Neben den beiden Branchenriesen Airbus und Lufthansa Technik sowie dem Flughafen Hamburg tragen über 300 kleine und mittelständische 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 Clustermanagement-Organisationen 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

<sup>29</sup> Dies geht über die rund 25.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten der Teilbranche 303 Luft- und Raumfahrzeugbau nach WZ 2008 in Abb. 3 hinaus, da auch angrenzende Branchen mit direktem Bezug zur Luftfahrt mit einbezogen werden. Details zur Methodik online unter: [https://www.iit-berlin.de/iit-docs/34c10ec753924613a471cf221ae1f3b7\\_die-luftfahrtbranche-in-der-metropolregion-hamburg.pdf](https://www.iit-berlin.de/iit-docs/34c10ec753924613a471cf221ae1f3b7_die-luftfahrtbranche-in-der-metropolregion-hamburg.pdf) (27.11.2023)

- Vernetzung der Akteure
- 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

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 BodenseeAIRea durch die regionale Wirtschaftsfördergesellschaft). Insbesondere die KMU 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.

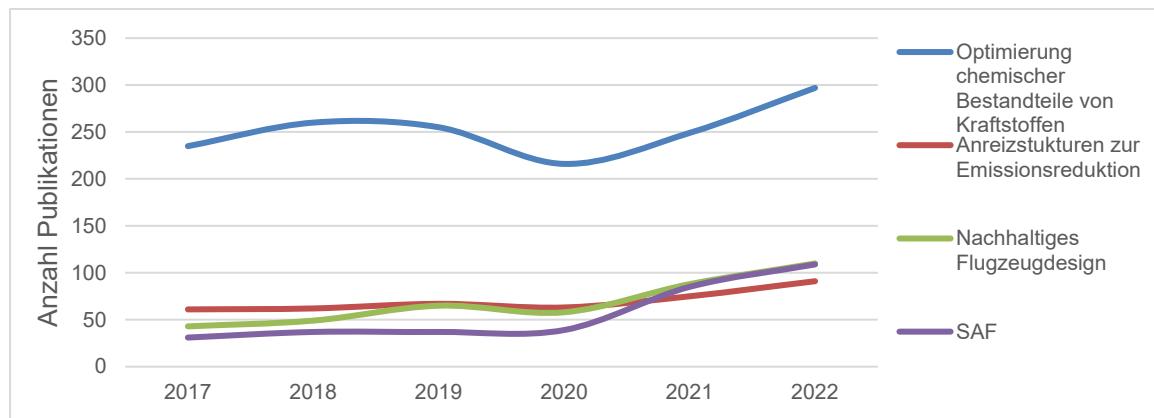
#### 5.1.1 Publikationsanalyse

Eine geeignete Datenquelle, um den aktuellen Stand der Technologien im Bereich klimaverträglicheres Fliegen zu analysieren, ist die Publikationsdatenbank Scopus.<sup>30</sup> 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 angelernt, um die Gesamtdatenmenge nach relevanten Publikationen zu durchsuchen.<sup>31</sup> 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 Themenschwerpunkt dieser Studie hin bewertet. Im Ergebnis zeigen sich folgende Technologieschwerpunkte (

Abb. 5), an denen weltweit geforscht wird.

Abb. 5: Weltweite Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens



<sup>30</sup> Scopus ist eine multidisziplinäre Literaturdatenbank, die einen (Voll-)Zugriff auf mehr als 75 Mio. Peer-Review-Fachartikel und Konferenzbeiträge aus den Naturwissenschaften, Technik, Medizin, Sozialwissenschaften sowie Kunst- und Geisteswissenschaften ermöglicht.

<sup>31</sup> Dabei wurden folgende relevante Themenschwerpunkte definiert:

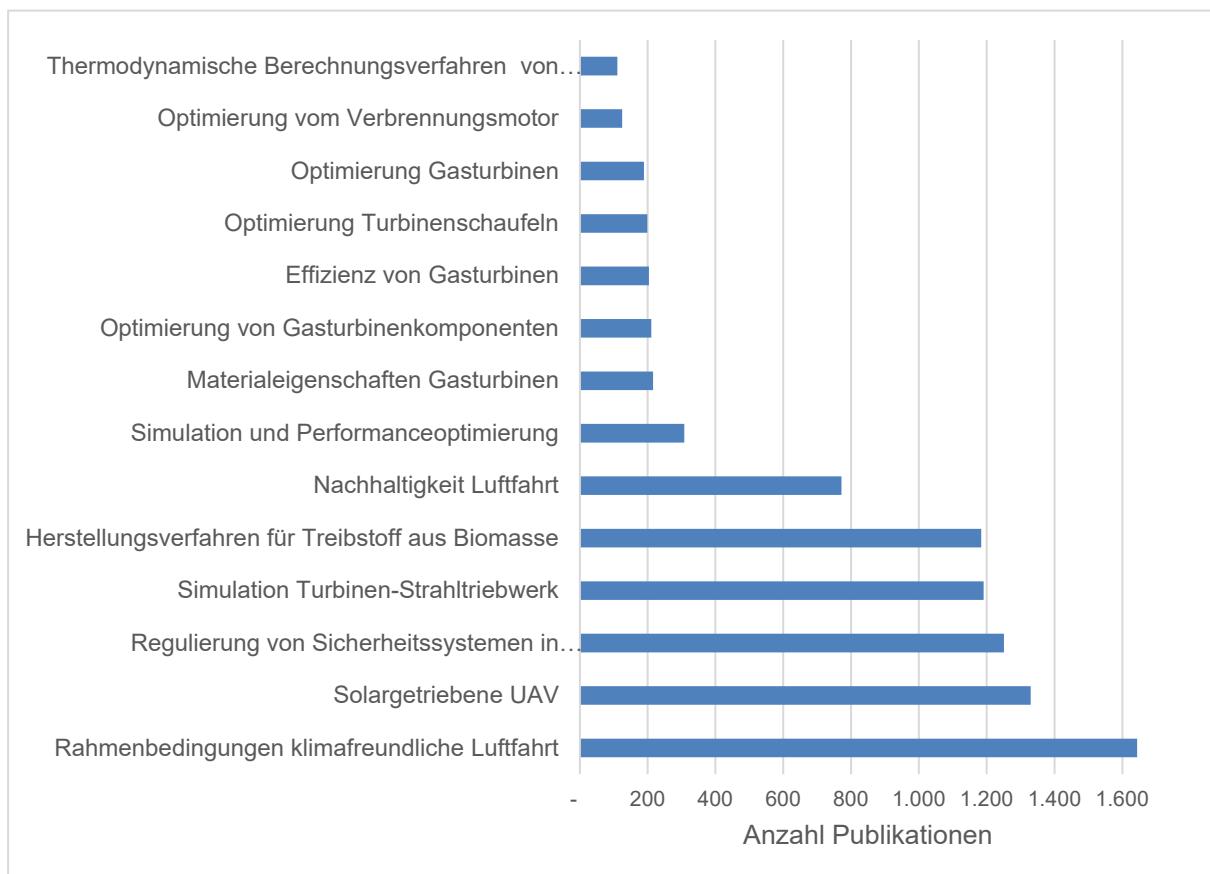
- engine, low-emission, immitent technolog\*, BETO, turbine, combustor operabilit\*
- e-fuels, hydrogen-powered electrofuel, low-carbon fuel\*, recycled carbon fuel\*, lower carbon aviation fuel\* low, power-to-liquid, sustainable aviation fuel, SAF, biojet, non-oil based, biofuel, renewable\*, used 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\*, HFS-SIP, HEFASPK, pyrolysis, hydrothermal liquefaction

Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank. Zeitraum 2017–2023. N = 2.774 Dokumente.

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 Sustainable Aviation Fuels (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 Abb. 6 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 CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Hinzu kommen regulatorische Fragen, die auf das Umfeld einwirken und damit einen Impact auf die technologischen Entwicklungen in den Bereichen Kraftstoffe und Antriebe haben. Auch angrenzende Technologiefelder haben eine Bedeutung, beispielsweise solargetriebene unbemannte Flugsysteme, die Simulation von Turbinenstrahltriebwerken oder die Herstellungsverfahren für Treibstoff aus Biomasse.

Abb. 6: Indirekte Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens (weltweit)

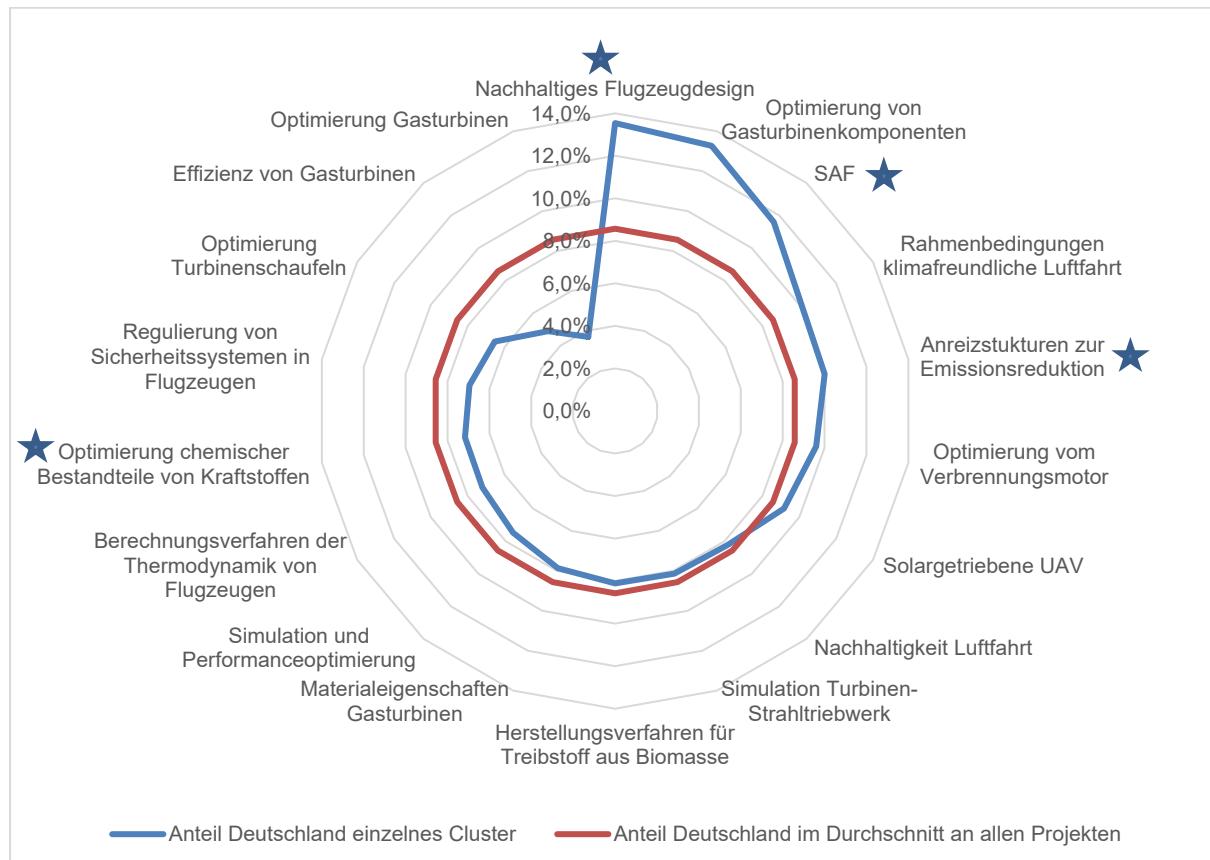


Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank. Zeitraum 2017–2023. N = 8.965 Dokumente.

Vergleicht man die Aktivitäten der deutschen Akteure an der Gesamtzahl der Publikationen, zeigt sich, dass vor allem bei den Thermenschwerpunkten Optimierung von Gasturbinenkomponenten, Herstellung von SAF,

Rahmenbedingungen für eine klimafreundliche Luftfahrt, Anreizstrukturen zur Emissionsreduktion, Optimierung vom Verbrennungsmotor und Solargetriebene unbemannte Fluggeräte (engl. Unmanned Aerial Vehicle, UAV) eine relativ hohe Beteiligung festzustellen ist (Abb. 7). Relativ gering hingegen ist der Anteil der Aktivitäten deutscher Akteure bei den Themen rund um 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.

Abb. 7: Relation der deutschen Beteiligung an den Aktivitäten im Vergleich zur Gesamtmenge



Eigene Darstellung auf Basis der Scopus-Datenbank. 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.

### 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 CORDIS<sup>32</sup> 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 aus der Vielzahl der Gesamtprojekte herauszufiltern.<sup>33</sup> 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.

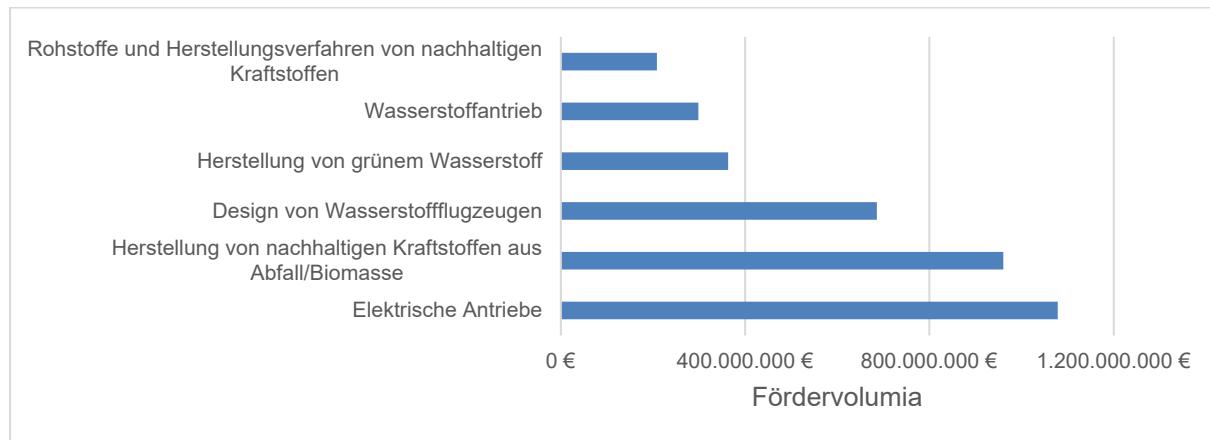
<sup>32</sup> <https://cordis.europa.eu/de> (12.07.2023)

<sup>33</sup> 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-synthethis
- engine, propulsion, advanced low-emission, immitent technology, low-emission, aircraft propulsion, combustor
- Sustainable, pollution, emission, decarbonisation, carbon dioxide, carbon, greenhouse gas, GHG

Insgesamt wurden auf diese Weise mehr als 2.000 relevante Projekte identifiziert, die einen Bezug zum klimaverträglicheren Fliegen haben.<sup>34</sup> 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 Abb. 8 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 Kraftstoffen 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 liegen die deutschen Akteure auf Rang zwei, hinter dem Vereinigten Königreich mit 144 Projekten und vor Spanien (115 Projekte), Frankreich (98) und Italien (93).

Abb. 8: Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten

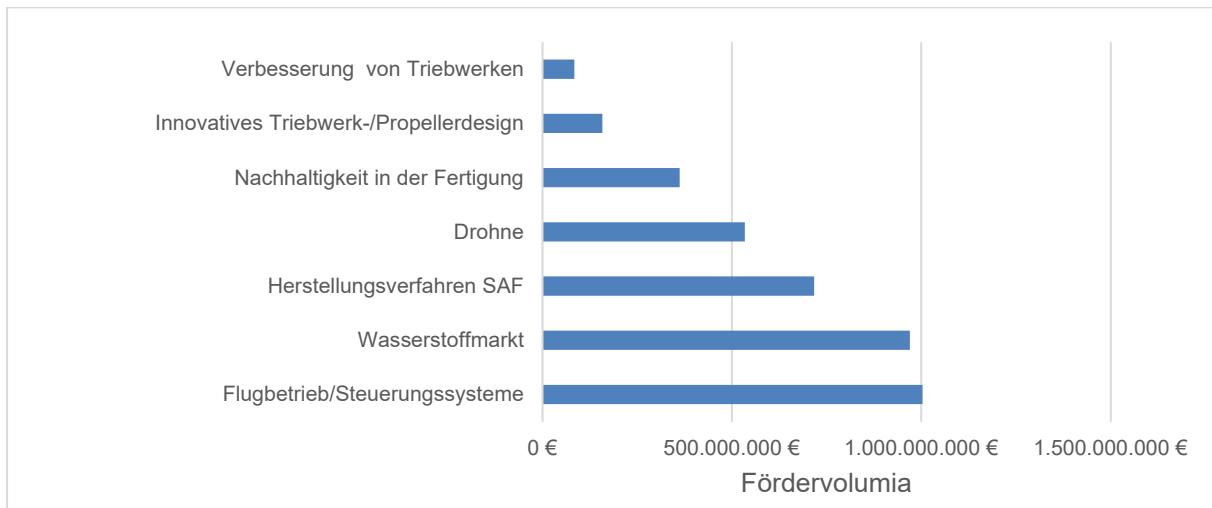


Eigene Darstellung auf Basis der CORDIS-Datenbank. Zeitraum 01/2017–03/2023, n = 928 Projekte

Hinzu kommen weitere Themencluster, die einen indirekten Bezug für den Themenschwerpunkt dieser Studie haben. Diese sind in Abb. 9 dargestellt. Dazu zählen insbesondere Projekte, die sich mit dem Flugbetrieb und den entsprechenden Steuersystemen oder dem Markt und der Infrastruktur für Wasserstoff auseinandersetzen. 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.

<sup>34</sup> Zeitraum: 01/2017–03/2023

Abb. 9: Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten



Eigene Darstellung auf Basis der CORDIS-Datenbank. Zeitraum 01/2017–03/2023, n = 1.086 Projekte

Innerhalb dieser Themencluster wurden in einem zweiten Schritt die *Schwerpunkte der deutschen Akteure* analysiert. Ziel ist 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 Abb. 10 zeigt sich, dass auch in den Projekten mit deutscher Beteiligung vor allem das Thema elektrische 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.

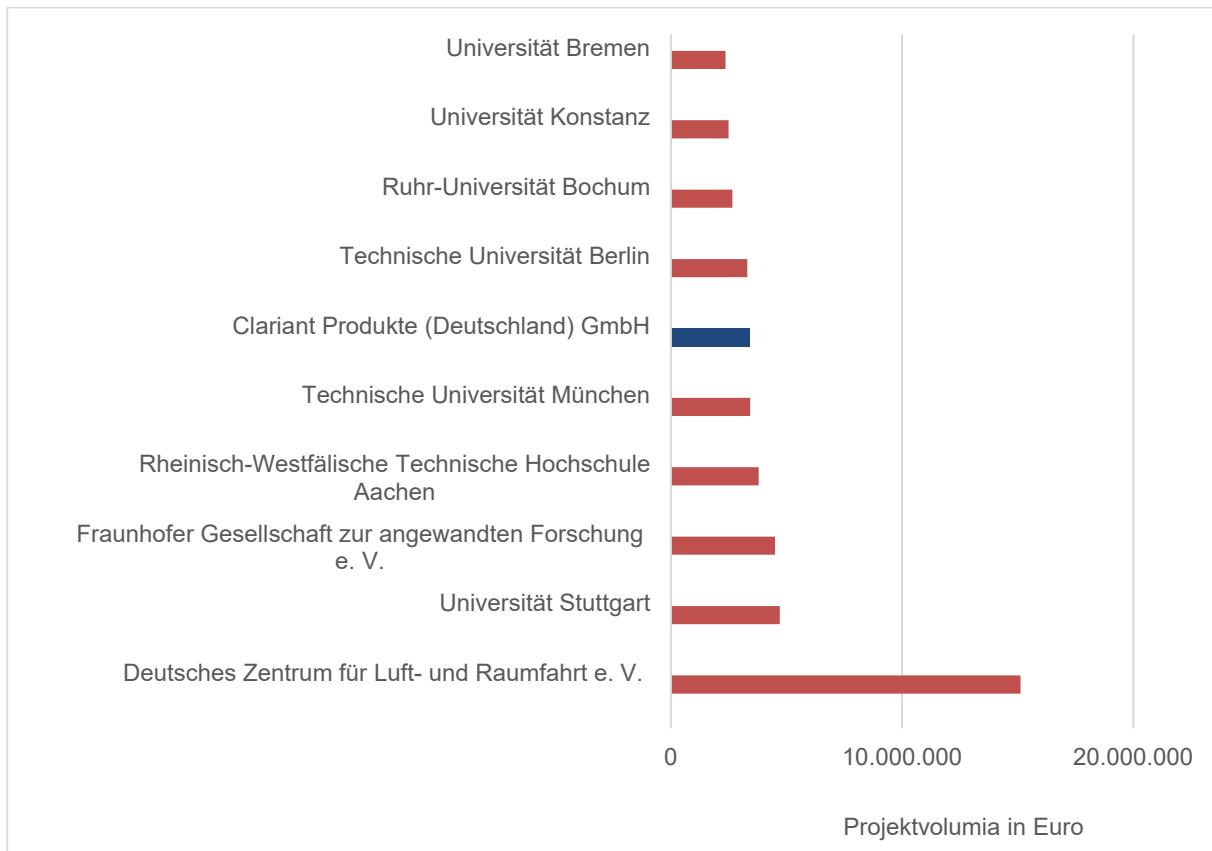
Abb. 10: Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten deutscher Akteure



Eigene Darstellung auf Basis der CORDIS-Datenbank. Zeitraum 01/2017–03/2023, n = 84 Projekte

Im Folgenden sind zudem die wichtigsten deutschen Akteure dargestellt, die die Projekte dieser vier Themenschwerpunkte realisieren (Abb. 11). 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, die Projekte umsetzen. Mit der Clariant GmbH ist nur ein Unternehmen unter den Top-Zehn-Akteuren aus Deutschland vertreten.

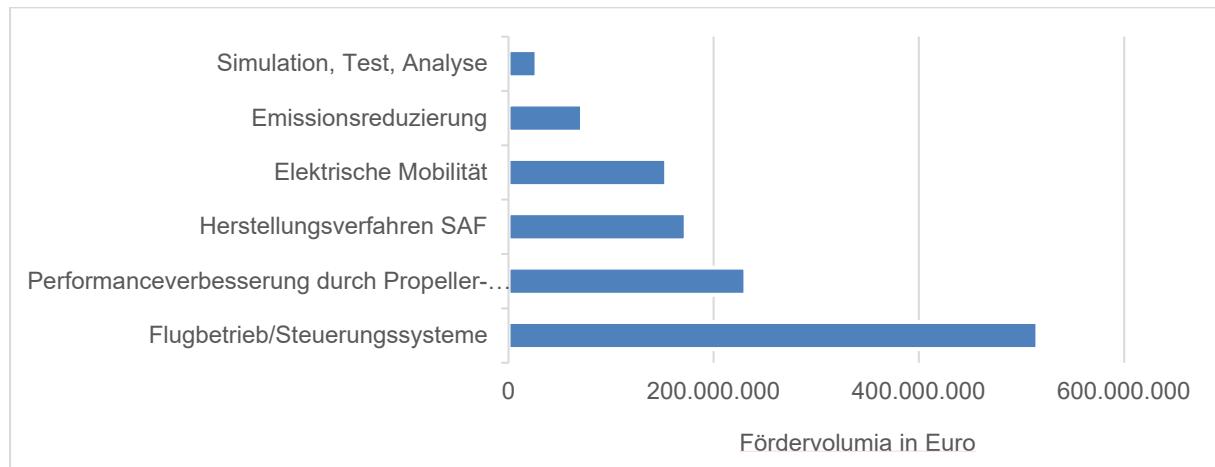
Abb. 11: Top-10-Akteure in Deutschland



Eigene Darstellung auf Basis der CORDIS-Datenbank.

Hinzu kommen weitere Themenschwerpunkte mit Beteiligung deutscher Akteure, die einen indirekten Bezug zum Fokus dieser Studie haben (Abb. 12). 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.

Abb. 12: Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten mit deutscher Beteiligung



Eigene Darstellung auf Basis der CORDIS-Datenbank. Zeitraum 01/2017–03/2023, n = 169 Projekte

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).

Die Analyse aktueller wissenschaftlicher Publikationen und europaweit geförderter Forschungsprojekte zeigt die *Technologieschwerpunkte* für die beiden Bereichen *Kraftstoffe* und *Antriebskonzepte* für einen klimafreundlicheren Luftverkehr. Diese sind zusammenfassend in Abb. 13 dargestellt.

Abb. 13: 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 CO<sub>2</sub>-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 Power-to-Liquid(PtL)-Technologie direkt aus Kohlendioxid und Wasserstoff hergestellt werden (Cabrera/de Sousa 2022).

Als sogenannte „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 2023). 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 e. V. 2020b). Dies ist von besonderer Bedeutung, da Flugzeuge eine Lebensdauer von bis zu 30 Jahren besitzen (Öko-Institut e. V. 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 e. V. 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 sowohl in Bezug auf die physikalischen Eigenschaften als auch auf die Gebrauchstauglichkeit (Afonso et al. 2023). Die Spezifikationen sind in der ASTM-Norm D7566 festgelegt (CAAFI 2023). Die ASTM International hat gemeinsam mit der CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative) die Norm D7566-21 „Specification for Aviation Turbine Fuels Containing Synthesized Hydrocarbons“ entwickelt, welche Spezifikationen in Form von Mindestanforderungen für konventionelle sowie nachhaltige Kraftstoffe definiert, die konventionellen Kraftstoffen beigemischt werden (ASTM International 2021). Ferner gilt für alle kommerziell verwendeten Kraftstoffe die ASTM D1665 „Standard Specification for Aviation Turbine Fuels“ oder DEF 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). Zu den größten Herausforderungen zählt 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-Einsparungspotenziale 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 (engl. Feedstocks) durch unterschiedliche Verfahren hergestellt werden. Zu den Ausgangsstoffen zählen u. a. Speiseöl, Pflanzenöle, feste Siedlungsabfälle (Müll), Holzabfälle, Abgase, Zucker sowie landwirtschaftliche Rückstände (CAAFI 2023) Im Jahr 2021 waren sieben Umwandlungsverfahren für die SAF-Produktion zugelassen (ASTM International 2021), 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.<sup>35</sup> Zu den aktuell nach D7566 anerkannten nachhaltigen Kraftstoffen zählen die folgenden Technologiepfade, die auf unterschiedlichen Rohstoffen basieren können (Tab. 4).

Tab. 4: Nachhaltige Flugzeugkraftstoffe, ihre jeweiligen Ausgangsrohstoffe und Beimischungsverhältnisse

Technologie	Rohstoffe	Beimischung max. [% v/v]	Technologie-reifegrad
<b>Anerkannt nach D7566-21</b>			
<b>Fischer-Tropsch-Synthese (FT-SPK) &amp; Fischer-Tropsch-Paraffin-Kerosin mit Aromen (FT-SKA)</b>	Feststoffabfälle, Kohle, natürliches Gas, Biomasse	50	7
<b>Wasserstoffbehandelte Ester und Fettsäuren-Technologien (HEFA-SPK)</b>	Pflanzenöle wie Palmöl, Leinöl, Purgiernuss, benutzte Kochöle; Tierfette	50	9
<b>HH-SPK &amp; HC-HEFA</b>	Öle aus der Botryococcus-braunii-Alge	10	6
<b>Synthesized Iso-Paraffin (HSF-SIP)</b>	Zuckerrohr, Zuckerrübe, Getreidestärke	10	5-7
<b>Alcohol-To-Jet-Technologien (ATJ) (Isobutanol/Ethanol)</b>	Zuckerrohr, Zuckerrübe, Sägemehl, Lignozellulose, Getreidestärke	50	7
<b>Katalytische Hydrothermolyse (CHJ)</b>	Abfallöle, Energieöle	50	6-7
<b>Anerkannt nach D1655</b>			
<b>Fette, Öle und Schmiermittel Co-Processing (FOG)</b>	Fette, Öle, und Schmiermittel	5	
<b>Fischer-Tropsch Co-Processing (FT)</b>	Karbon-basierte Biomasse	5	
<b>Weitere in Entwicklung</b>			
<b>Elektrotreibstoff (Power-to-Liquid)</b>	Wasser, Luft (Erdöl)	100	
<b>CO<sub>2</sub> to SAF</b>	CO <sub>2</sub>	100	

Quelle: (Afonso et al. 2023; Bauen et al. 2020; IATA; Shahriar/Khanal 2022)

#### *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.<sup>36</sup> Der Anteil alternativer Biokraftstoffe im Luftverkehr in der EU liegt aktuell nur bei 0,05 % aller verwendeten Treibstoffe (Öko-Institut e. V. 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 2020a). Langfristig müssten ca. 449 Mrd. SAF produziert werden, um das

<sup>35</sup> <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel> (1.11.2023)

<sup>36</sup> <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel> (27.11.2023)

Ziel einer klimaneutralen Luftfahrt bis 2050 zu erreichen. Dies erfordert geeignete Anreize und langfristige politische Maßnahmen, die die Verwendung von SAF fördern.<sup>37</sup>

Zudem ist zu berücksichtigen, dass Biokraftstoffe nur eine nachhaltige Alternative zu fossilen Kraftstoffen darstellen, wenn ihre Treibhausgas- und Luftschatstoffemissionen 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 zweifachen für einige abfallbasierte Quellen bis zum 6- bis 10-fachen für synthetische Kraftstoffe mit Kohlenstoffabscheidung.<sup>38</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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

Elektrotreibstoffe (engl. 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 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) 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 nichtfossilen 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 CO<sub>2</sub>-Anteil, sodass die Abscheidung verhältnismäßig wenig Strom verbraucht (Öko-Institut e. V. 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 e. V. 2020b). Die Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus der Luft (Carbon Capture, siehe unten) stellt in diesem Zusammenhang eine weitere Möglichkeit dar (World Economic Forum 2022, S. 11 f.); allerdings ist der Energieverbrauch aufgrund der geringen CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft (0,04 %) mit 0,7 bis 1,8 MJ (Strom)

<sup>37</sup> <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel> (27.11.2023)

<sup>38</sup> <https://aviationbenefits.org/faqs/what-is-sustainable-aviation-fuel/> (27.11.2023)

und 5,4 bis 9,0 MJ (Wärme) pro kg Kohlendioxid deutlich höher (Öko-Institut e. V. 2020b). Eine Skalierung von Power-to-Liquid-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 (World Economic Forum 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 e. V. 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 e. V. 2020b). Ein Nachteil synthetischer Kraftstoffe liegt im begrenztem Treibhausgas-minderungspotenzial: Zwar lassen sich (fossile) CO<sub>2</sub>-Emissionen vermeiden, andere Luftschadstoffe werden jedoch weiterhin bei der Verbrennung ausgeschieden (Öko-Institut e. V. 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 e. V. 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 e. V. 2020b).

*Carbon Capture to Sustainable Aviation Fuel* (CCSAF, oder auch DACCS für „Direct Air Carbon Capture and Storage“) ist ein innovativer Ansatz, der darauf abzielt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Atmosphäre zu erfassen (Öko-Institut e. V. 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, CO<sub>2</sub>-Recycling und nahtlose Integration in die bestehende Luftfahrtindustrie. Allerdings gibt es Herausforderungen, darunter die unzureichende Effizienz des CO<sub>2</sub>-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 Umwelt-auswirkungen mit der Art der verwendeten Elektrizität zusammen.

#### *Die Bedeutung von Wasserstoff als Brennstoff für eine klimaneutrale Luftfahrt*

Bereits seit den 1980er Jahren wurde Wasserstoff im Luftverkehr erprobt. Seit dem Jahrtausendwechsel wurden mehrere Brennstoffzellen-Kleinflugzeuge 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 Kilometern zurücklegen kann (Öko-Institut e. V. 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 e. V. 2020b). Trotz dieser Isolierung kann es jedoch zum „Boil-Off“ kommen, dem Verdampfen von H<sub>2</sub> und den entsprechenden Energieverlusten. Deshalb sind besondere Sicherheitssysteme notwendig. Darüber hinaus wird bei der Wasserstoffspeicherung deutlich mehr Raum im Flugzeug benötigt, da verflüssigter Wasserstoff eine auf das Volumen bezogen Dreiviertel geringere Energiedichte als Kerosin hat (Öko-Institut e. V. 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 e. V. 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 e. V. 2020b). All 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<sub>2</sub>-Effekte die Klimawirkung um 50 bis 75 % reduziert werden können, wenn Wasserstoff als Brennstoff verwendet wird (Öko-Institut e. V. 2020b). Im Falle der Nutzung in Brennstoffzellen wird sogar eine Minderung um 75 bis 90 % erwartet (Öko-Institut e. V. 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 e. V. 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 e. V. 2020b). Zudem wären extrem hohe Investitionen nötig, um die Infrastruktur zur Erzeugung dieser Kraftstoffe aufzubauen (Öko-Institut e. V. 2020b). Es müssten die politischen Rahmenbedingungen wie beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Bepreisung dazu beitragen, dass die notwendigen Kraftstoffmengen produziert werden können (Öko-Institut e. V. 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen und auch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte treten nicht auf – im Gegensatz zu alternativen Kraftstoffen und mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen (Öko-Institut e. V. 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 e. V. 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 e.V. 2020b). Und auch in Zukunft wird sich ihr Einsatz wahrscheinlich auf kleinere Flugzeuge und Kurzstrecken beschränken, beispielsweise für den Flug auf Inseln (Öko-Institut e.V. 2020b).

#### ***Wasserstoffbrennstoffzelle***

Wasserstoffbrennstoffzellen wandeln Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) in Wasser ( $H_2O$ ) 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 e.V. 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 Wasserstoffbrennstoffzelltechnologie 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 Hybrid-Elektrotechnologien 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 Antriebssystem, der Gewicht- und Platzbedarf zusätzlicher Komponenten an Bord sowie die eingeschränkte Reichweite (Interview Donus).

### *Water-enhanced Turbofantriebwerke (WET)*

Da Turbofantriebwerke 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 von Turbofantriebwerken 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 Brennkammer oder am Kompressor. Das eingespritzte Wasser hilft bei der Kühlung der Verbrennungsgase 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 Water-enhanced Turbofan für eine klimaneutrale Luftfahrt*

Neben der Effizienzsteigerung gegenüber konventionellen Antrieben verringert die Einspritzung des Wassers beim WET die Bildung von Stickoxiden (NOx) während der Verbrennung. NOx 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 oben 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.

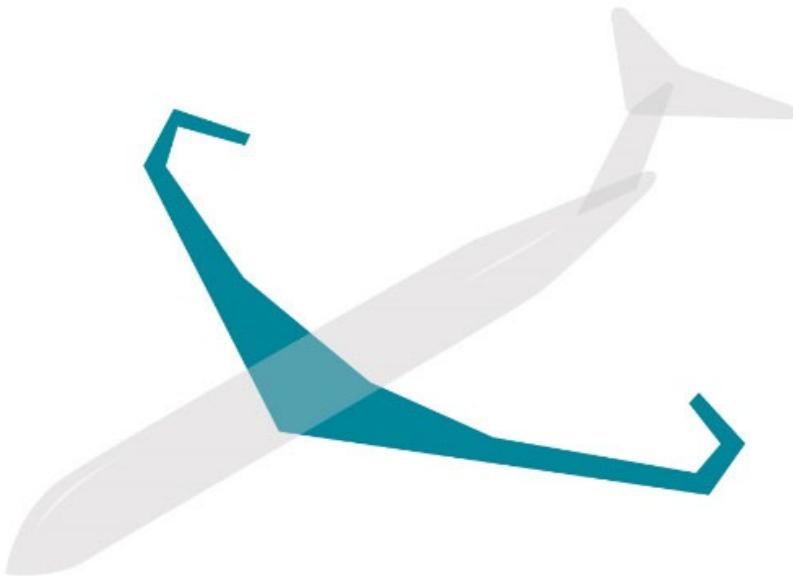
## **5.4 Weitere Innovationsbereiche**

Die Dekarbonisierung der Luftfahrt wird nicht allein mit Innovationen in den Bereichen Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte zu bewerkstelligen sein. Darüber hinaus spielt die Optimierung sowohl des Flug- als auch des Bodenbetriebs eine wesentliche Rolle (Afonso et al. 2023). So könnten beispielsweise nicht nur die hohen Kraftstoffkosten von E-Fuels abgedeckt und die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Fluggast reduziert, sondern auch die Reichweite von Flugzeugen mit alternativen Antriebskonzepten erhöht werden (Öko-Institut e. V. 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

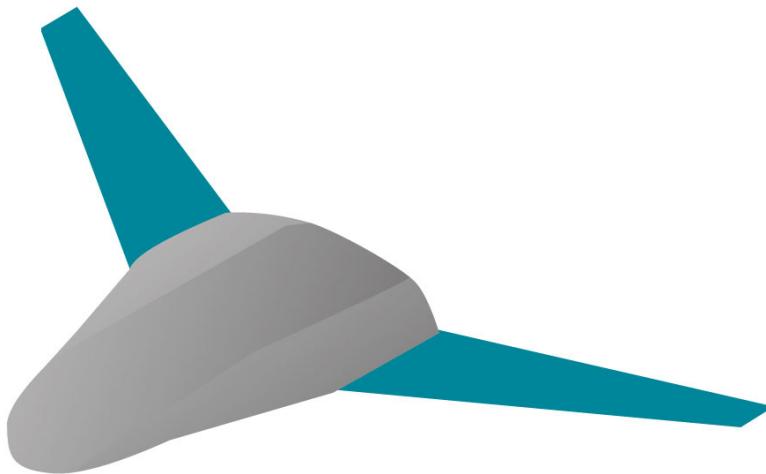
Oberflächenbeschaffenheit oder die Verwendung gebogener Flügelspitzen (Winglets, Abb. 14), lässt sich der Kraftstoffverbrauch senken und die Reichweite erhöhen (Öko-Institut e. V. 2020b).

Abb. 14: Winglet-Design



Eigene Darstellung nach (Afonso et al. 2023)

Abb. 15: Blended Wing Body-Design



Eigene Darstellung nach (Afonso et al. 2023)

In Zukunft könnte insbesondere das *Blended Wing Body-Design* (BWB; Abb. 15) eine besonders interessante neuartige Flugzeugform darstellen (Öko-Institut e. V. 2020b). Darüber hinaus entwirft die 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 (Margetta 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).

*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 im Jahr 2020 gelungen, die erste vollautomatische Luftbetankung mit einem A330-Tankflugzeug durchzuführen (Airbus 2023a).

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 zunichte gemacht (Afonso et al. 2023).

*Flugplanung:* Eine optimierte Flugplanung auf der Ebene der Fluggesellschaften und des Flugverkehrsmanagements (ATM, Air Traffic Management) 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 sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus 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<sup>39</sup> und „Single European Sky ATM Research“ (SESAR) der EU (SESAR 2020) bearbeitet werden.

*Flugroutenoptimierung mittels Digitalisierung:* Auch betriebliche Maßnahmen können erheblich zur Effizienzsteigerung 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 e. V. 2020b). Mithilfe fortgeschrittenen 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.

---

<sup>39</sup> <https://www.faa.gov/nextgen> (27.11.2023)

Das weitere Energieeinsparpotenzial für Flugroutenoptimierung wird als niedrig bis mittel eingeschätzt bei hoher Technologiereife (Afonso et al. 2023). Hierbei könnten Synergieeffekte mit Air Travel Management (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 (Forbes 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 (NREL 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 sowohl für den Boden- als auch 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 vielversprechendsten in Bezug auf Treibstoffeinsparungen, die bis zu 21 % erreichen könnten (Afonso et al. 2023). Diese Treibstoffeinsparungen werden jedoch nur für Langstreckenflüge 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

Das vorangegangene Kapitel gab 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 aussreichend, 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 (NREL 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 (NREL 2022).

Wie im vorangegangenen Kapitel deutlich wurde, hat jede der vorgestellten Optionen ihre spezifischen Vorteile 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.

Tab. 5 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 Regionalstreckenflügen, ab etwa 2040 auf Kurzstreckenflügen und ab etwa 2050 auf Mittelstreckenflügen zum Einsatz zu kommen (ATAG 2021).

Tab. 5: Überblick über Zeithorizonte und Technologieverfügbarkeit in der Luftfahrt

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Pendelflug</b> – 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
<b>Regionalstrecke</b> – 50–100 Sitze – 60–90 min. Flugzeit – ~ 3 % CO2-Emissionen	SAF	SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-brennstoffzelle und/oder SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-brennstoffzelle und/oder SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-brennstoffzelle und/oder SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-brennstoffzelle und/oder SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-brennstoffzelle und/oder SAF
<b>Kurzstrecke</b> – 100–150 Sitze – 45–120 min. Flugzeit – ~24 % CO2-Emissionen	SAF	SAF	SAF	SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-verbrennung und/oder SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-verbrennung und/oder SAF	Elektrisch oder Wasserstoff-verbrennung und/oder SAF
<b>Mittelstrecke</b> – 100–250 Sitze – 60–150 min. Flugzeit – ~24 % CO2-Emissionen	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF Ggf. Wasserstoff
<b>Langstrecke</b> – 250+ Sitze – 150+ min. Flugzeit – ~30 % CO2-Emissionen	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

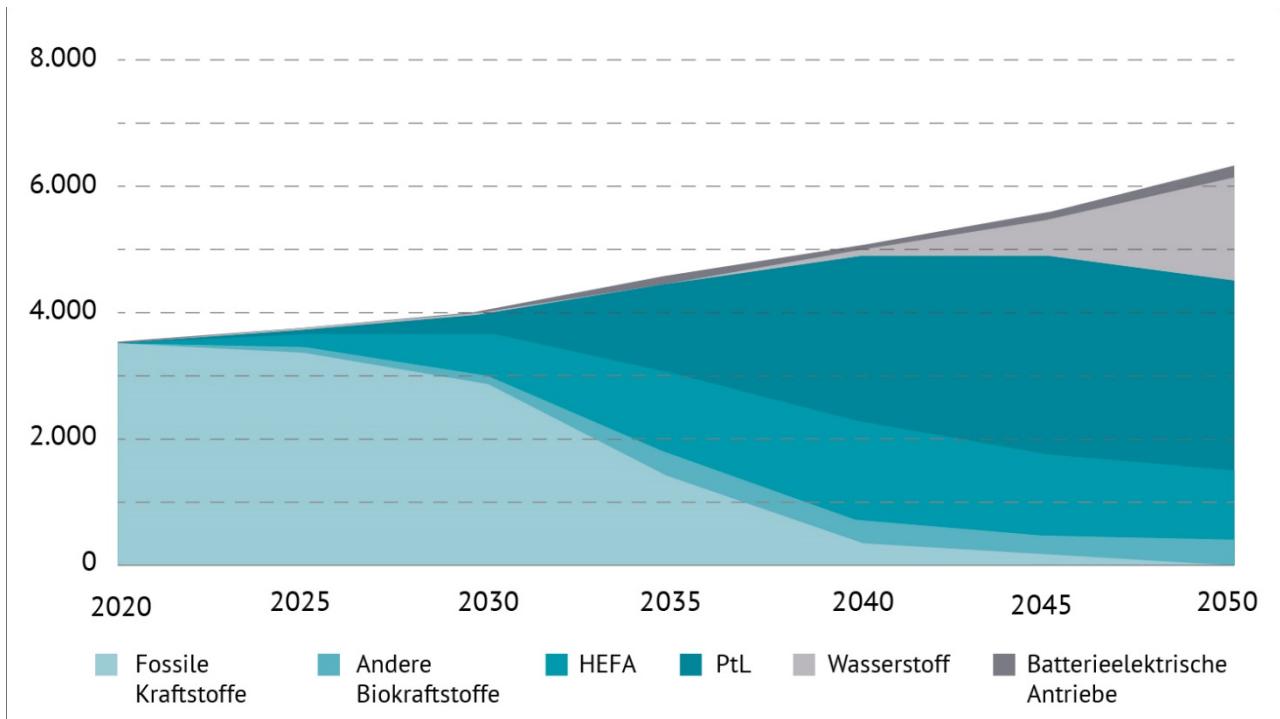
Eigene Darstellung nach ATAG 2021, S. 54

Die Kernherausforderung bei der Entwicklung und Implementierung neuer Lösungen in der Luftfahrtbranche ist die lange Dauer, bis ein Produkt den Markt erreicht („time-to-market“), 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.

Abb. 16 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.<sup>40</sup> Fossile Brennstoffe werden zunächst weiterhin 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.

<sup>40</sup> <https://www.topsoe.com/sustainable-aviation-fuel/saf-outlook> (20.10.2023); unter Verweis auf die SAF-Roadmap der IATA.

Abb. 16: Technologiepfade und Beiträge zur Klimaneutralität



Quelle: <https://www.topsoe.com/sustainable-aviation-fuel/saf-outlook>

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 e. V. 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 (Zentrum Liberale Moderne 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 Wandel der Wertewertstellungen, die Entscheidungen über die Wahl der Verkehrsmittel beeinflussen, ist gegenwärtig nur schwer zu erkennen. Eine repräsentative Befragung in Deutschland zeigt beispielsweise für den Privatbereich,<sup>41</sup> 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 (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme 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.

<sup>41</sup> Die Aussage stützt sich auf eine repräsentative Befragung, die im Oktober 2019 durchgeführt worden ist. Die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie sind daher bei den Ergebnissen nicht berücksichtigt.

ren. Begründet wird eine geplante Reduzierung der Flugreisen von einem Viertel der Befragten mit Klimaschutz<sup>42</sup> (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme 2020, S. 13 f.). Inwieweit die Erfahrungen während der COVID-19-Pandemie einen dauerhaften Wandel dieser Einstellung bewirken, ist gegenwärtig nur in Form von 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 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 des Jahres 2019, wenngleich der Wiederanstieg im Privatbereich schneller zu verlaufen scheint als im Bereich der Geschäftsreisen (Destatis 2023b).

#### *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 zum Jahr 2100 weiter wachsen, wenngleich nicht in dem Maße wie bisher. Schätzungen zufolge sind zwischen rd. 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 im Jahr 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 %) (Flughafenverband 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 Bruttoinlandsproduktes (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 im Jahr 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. Oben ist bereits das Verhältnis von wirtschaftlicher Entwicklung und Flugreisen dargestellt worden. An dieser Stelle geht es daher um die mögliche Entwicklung von Ticketpreisen sowie die individuelle Zahlungsbereitschaft.

<sup>42</sup> Weitere Gründe sind die Kosten für den Flug, die Kosten für Reisen insgesamt, sowie Änderungen im Privatleben und Änderungen im beruflichen Bereich.

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 unter anderem 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 % (tagesschau.de 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.<sup>43</sup> Zudem könnte es künftig für Fluggesellschaften noch erforderlicher sein, externe Effekte<sup>44</sup> 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 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. 2 f.). 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. 7 ff.).

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, d. h. 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.).

### *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

<sup>43</sup> Für eine Gegenüberstellung der möglichen Preisentwicklungen in drei Szenarien z. B. Eurocontrol 2022, S. 19.

<sup>44</sup> Einen allgemeinen Überblick über externe Effekte und Kosten des Verkehrssektors bieten beispielsweise Bieler/Sutter (2019).

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 Standardisierung<sup>45</sup> wird sichergestellt, dass Flugkraftstoffe weltweit 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 Sicherheitsspezifikationen 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 MPa<sup>46</sup> und Temperaturen von -253 °C zu treffen (Qazi 2022, S. 7). Damit einher geht eine Neugestaltung der Tanks und des Flugzeugrumpfes (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 (DLR 2021b, S. 143; Walker 2020, S. 243). Für die Sicherheit von Batterien, insbesondere für Li-Ionen-Batterien, gilt außerdem, dass Überhitzung durch Hochspannung vermieden werden muss. Festkörperbatterien bilden hier eine mögliche, sicherere Alternative (Adu-Gyamfi/Good 2022, S. 6). Tab. 6 gibt einen Überblick über alternative Energieträger für die Luftfahrt und enthält u. a. eine qualitative Einschätzung der Sicherheit der jeweiligen Energieträger.

---

<sup>45</sup> Die für Flugzeugkerosin maßgeblichen internationalen Standards sind: ASTM D1655: <https://www.astm.org/d1655-22a.html> (27.11.2023), ASTM D7566: <https://www.astm.org/d7566-22.html> (27.11.2023)

<sup>46</sup> Megapascal

Tab. 6: Sicherheit und weitere Parameter verschiedener Energieträger (qualitativer Vergleich)

Parameter	Kerosin	Biokraftstoff	Batterien	e-Kerosin	LNG <sup>47</sup>	LH <sub>2</sub> <sup>48</sup>	e-L-CH <sub>4</sub>
<b>Energie</b>	+	+	--	+	+	++	+
<b>Volumen-Energiedichte</b>	++	++	--	++	+/-	-	+/-
<b>Emissionen</b>	--	+/-	++	+/-	-	+	+/-
<b>Kosten</b>	++	-	+	--	++	-	-
<b>Verfügbarkeit</b>	++	-	-	-	+	+/-	--
<b>Infrastruktur</b>	++	-	+/-	+/-	+	-	+
<b>Sicherheit</b>	+	+	-	+	+/-	--	+/-
<b>Kompatibilität</b>	++	++	-	++	+/-	-	-
<b>Luftqualität<sup>49</sup></b>	--	-	++	-	+	+	+
<b>Klimawirkung</b>	--	+/-	++	+/-	+/-	+	+/-
<b>Wissenschaftlicher Kenntnisstand Klimawirkung</b>	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Niedrig	Sehr niedrig	niedrig
<b>Technologie-reifegrad</b>	9	8	5	7	4	3	4

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

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 Befragung<sup>50</sup>

<sup>47</sup> Bezogen auf fossiles Flüssiggas

<sup>48</sup> Bezogen auf grünen Wasserstoff

<sup>49</sup> Bezogen auf den Flugbetrieb

<sup>50</sup> Repräsentative Onlineumfrage mit mehr als 3.000 Befragten als Bestandteil des Projektes GNOSIS, das zwischen 07/2020 und 06/2023 im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo VI Call 1 gefördert wurde.

ermittelt, dass rund drei Viertel der Befragten mit derartigen Flugzeugen 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.<sup>51</sup>

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. Weiter oben ist bereits der sich abzeichnende gesellschaftliche Wertewandel dargestellt worden, 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. 1). 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. Im Jahr 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*, siehe 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 (IW 2023). Nichtsdestotrotz wird die Steuerungswirkung der CO<sub>2</sub>-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

<sup>51</sup> <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/de/forschungsbereiche/urban-regional-air-mobility/passagierakzeptanz-von-hybrid-elektrischen-flugzeugen-in-deutschland> (19.09.2023)

dieser Konkurrenzsituation abhängig. Dies könnte die Wirtschaftlichkeit von Technologien für klimaverträgliches Fliegen beeinflussen, da die Beschaffung 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.

Auf der anderen Seite 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 CO<sub>2</sub>-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).

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 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 aufzubauen 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 e. V. 2020b). Zudem wären extrem hohe Investitionen nötig, um die Infrastruktur zur Erzeugung dieser Kraftstoffe aufzubauen (Öko-Institut e. V. 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. 0) 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. 1) 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-CO<sub>2</sub>-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-CO<sub>2</sub>-Effekte in Vorhersagemodellen bestmöglich abilden zu können, sind gegenwärtig noch Forschungslücken zu schließen. So ist beispielsweise noch nicht vollständig erklärbar, unter welchen Umständen die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte auftreten (Interview Nagel). Wie bereits oben ausgeführt (Kap. 2.2), sind Nicht-CO<sub>2</sub>-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 Reiseschwindigkeiten 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 Luftschatdstoffen 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 Luftschatdstoffen 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 gesehen, den Klimawandel zu begrenzen (UBA 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.

Unter anderem bestehen bei verschiedenen Kompensationsmaßnahmen Unterschiede darin, welche Emissionen überhaupt kompensiert werden. Häufig sind es nur die CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> (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 CO<sub>2</sub> ein Zertifikat ausgegeben.<sup>52</sup>

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 (UBA 2018, S. 11 ff.). Auch der Kauf und die anschließende Nichtnutzung von CO<sub>2</sub>-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 Euro bis 70 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> (Schulz 2020), wobei selbst 70 Euro als zu niedrig angesetzt gelten. Würden stattdessen die sozialen CO<sub>2</sub>-Kosten<sup>53</sup> angesetzt, so müssten durchschnittlich 170 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> 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 (UBA 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 (UBA 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.<sup>54</sup> Zudem scheint bislang

<sup>52</sup> <https://fliegen-und-klima.de/wie-funktioniert-kompensation.html> (20.09.2023)

<sup>53</sup> Die sozialen bzw. gesellschaftlichen Kosten von CO<sub>2</sub> sind eine Metrik für eine monetäre Betrachtung der Schäden, die einer Gesellschaft durch den Ausstoß einer zusätzlichen Tonne CO<sub>2</sub> entstehen.

<sup>54</sup> <https://fliegen-und-klima.de/ist-kompensation-sinnvoll.html> (19.09.2023)

die Bereitschaft zur Kompensation in Deutschland eher gering ausgeprägt zu sein: 85 % der Deutschen haben im Jahr 2019 angegeben, noch nie die Emissionen einer Flugreise kompensiert zu haben. Dies immer zu tun, gab nur 1 % der Befragten an (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme 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 CO<sub>2</sub> wieder freizusetzen.<sup>55</sup>

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 umzusetzen, d. h. Marktregulierung und -anreize entsprechend auszustarieren und gleichzeitig breite Förderinitiativen für Forschung und Entwicklung sowie Unterstützung beim Aufbau der notwendigen Infrastruktur zu implementieren (Interviews Cames, Grimme u. Kasten; Expertenworkshop, 21.06.2023).

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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr spielt der europäische Emissionshandel (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, 21.06.2023). Im Kontext des EU-EHS ist des Weiteren zu beachten, dass dieses aktuell Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte nicht einbezieht. Daher ist es von besonderer Bedeutung, effektive Lösungen zur Reduzierung von Nicht-CO<sub>2</sub>-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 unterschiedlichster Akteure – wird beispielsweise vor dem Hintergrund der Entwicklung der RefuelEU-Aviation-Verordnung deutlich, die unter anderem 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 bestehet damit ein großes Investitionsrisiko. Geeigneter seien stattdessen langfristige Abnahmeverpflichtungen für PtL-Kraftstoffe, ähnlich beispielsweise einer Einspeisevergütung bei erneuerbarem Strom. Auf dies 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 (Kap. 3.2.3) geschaffen worden sei (airliners.de 2023; Zentrum Liberale Moderne 2023).

<sup>55</sup> <https://fliegen-und-klima.de/eine-frage-der-qualitaet.html> (19.09.2023)

### *Verstärkte FuE-Förderung*

Der Luftfahrtsektor ist geprägt von vergleichsweisen 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 (Zentrum Liberale Moderne 2023). Daher bedarf es einer erheblichen Steigerung öffentlicher und privatwirtschaftlicher Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie einer Beschleunigung von Entwicklungszyklen und Zulassungsverfahren (Zentrum Liberale Moderne 2023). Als Beschleunigungstreiber auf nationaler Ebene könnte die staatliche Förderung eines Demonstrator-Programms 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 (BMUV et al. 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 (BMUV et al. 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 (BMWK 2023a). 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. Entsprechende 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 aromatenfreie<sup>56</sup> 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<sup>57</sup>. 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, 21.06.2023).

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 RefuelAviation-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 oben genannte vorgesehene Monitoring (QUERVERWEIS) eine wichtige Rolle bei der Erzielung kurzfristiger Effekte, denn die schrittweise

<sup>56</sup> 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. Quelle: <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/emissionsfreies-fliegen/co2-fussabdruck-und-klimawirkung-von-kondensstreifen-senken> (1.11.2023)

<sup>57</sup> <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/emissionsfreies-fliegen/co2-fussabdruck-und-klimawirkung-von-kondensstreifen-senken> (1.11.2023)

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 Berücksichtigung 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 sowohl über theoretisches als auch 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 Berndes/Belitz 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 ist zwar das Qualifikationsniveau der Fachkräfte als Stärke betont worden, 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 Adoptionszyklen 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.

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 Demonstrator-Projekt X.66A von NASA und Boeing mit rund 1,15 Mrd. US-Dollar im Rahmen einer groß angelegten Förderinitiative<sup>58</sup> (Margetta 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 und 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.

---

<sup>58</sup> United States Aviation Climate Action Plan; Details verfügbar unter: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation\\_Climate\\_Action\\_Plan.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf) (20.09.2023)



## 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 hybrid-elektrischen 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 CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre sowie eine Vermeidung von Flügen bzw. eine Verlagerung von Flügen auf andere Verkehrsträger nicht erreichen.

Allerdings lässt sich mithilfe der oben 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 & Claim-Konzepte unterstützt werden. Die Wertschöpfungsbzw. Lieferkette von SAF könnte auf diese Weise nachhaltig gestaltet werden. Kern von Book & 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 Flughafen-nähe, 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 Emissions-einsparungen auch weitergegeben werden können und eine erhöhte Nachfrage zu einer Ausweitung der Produktionskapazitäten führt (aireg 2022, S. 2 ff.). Book & Claim-Konzepte können zudem dazu beitragen, dass die Einsparungen durch SAF auch im EU-EHS abgebildet werden können (Pechstein et al. 2020).

Ein weiterer Hebel ist die Anpassung der Besteuerung der Luftfahrt durch Erhebung einer Kerosinsteuere. Da die Luftfahrt bereits auf vielfältigen Wegen besteuert wird, ist eine Kerosinsteuere 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 oben 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-CO<sub>2</sub>-Effekten einfließen (Kap. 6.2.3). Die Vermeidung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten kann besonders effektiv Wirkung erzielen, da sie im Verhältnis zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich stärker wirken (Kap. 2.2). Allerdings ist die Optimierung von Flugrouten nicht nur eine Frage des Wissenstandes 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 29.06.2023).

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 Deutschland 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 (Statista GmbH 2023). Rund 60 % der Flüge (rd. 56.000) entfielen auf Kurzstrecken (< 300 km), ca. 10 % (rd. 9.800) auf Langstrecken (> 1.000 km) (tagesschau.de 2023a). Der Anteil von Privatflügen an den CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt weltweit geschätzt rund 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen pro PKM betragen, während ein Passagierflugzeug durchschnittlich 0,128 kg CO<sub>2</sub>-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 sowohl über eine Besteuerung bzw. den Emissionshandel als auch über die Einführung neuer Antriebskonzepte nachzudenken, wie etwa den batterieelektrischen Flugantrieb, um die klimaschädliche Wirkung zu reduzieren. Eine darüberhinausgehende Option könnte sogar ein Verbot von Kurzstreckenflügen sein, wie es beispielsweise in Frankreich umgesetzt worden ist (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 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. 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).

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 abhängigen<sup>59</sup> 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 Reduktionspotenzial<sup>60</sup> 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 oben 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.

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 röhren, 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.

---

<sup>59</sup> Situative Abhängigkeiten wären beispielsweise dort gegeben wo SAF auf Algenbasis besonders wirtschaftlich und ökologisch hergestellt werden könnten.

<sup>60</sup> Derartige Flugrouten können anhand der atmosphärischen Zusammensetzung, der Temperatur sowie der vorgesehenen Flughöhe und Reisegeschwindigkeit eines Flugzeuges ermittelt werden.



## 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
- Afonso, F.; Sohst, M.; Diogo, C.; Rodrigues, S.; Ferreira, A.; Ribeiro, I.; Marques, R.; Rego, F.; Sohouli, A.; Portugal-Pereira, J.; Policarpo, H. et al. (2023): Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review. In: Progress in Aerospace Sciences 137
- Airbus (2023a): 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> (20.10.2023)
- Airbus (2023b): Global Market Forecast 2023. <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlccta136/files/2023-06/Airbus%20Global%20Market%20Forecast%202023-2042%20Presentation.pdf> (20.10.2023)
- 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. (Bock, T.; Habersetzer, A.), <https://relaunch.aireg.de/wp-content/uploads/2023/08/220601-ABookandClaimApproachforSAF.pdf> (26.10.2023)
- Aireg (2023): Klimaschutz in der Luftfahrt: Quote allein reicht nicht. 5.5.2023, <https://aireg.de/klimaschutz-in-der-luftfahrt-quote-allein-reicht-nicht/> (20.10.2023)
- Airliners.de (2021): Anteil der Distanzklassen an den CO2-Emissionen der Flüge Europas im Jahr 2020. In: Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1204631/umfrage/co2-emissionen-der-luftfahrt-in-europa-nach-distanzklasse/> (26.10.2023)
- Airliners.de (2023): Airbus kritisiert US-Subventionspaket für Nachhaltigkeit. <https://www.airliners.de/airbus-kritisiert-us-subventionspaket-nachhaltigkeit/67925> (20.10.2023)
- 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
- Ascend (Ascend FlightGlobal) (2023): Anzahl der Flüge in der weltweiten Luftfahrt von 2014 bis 2022. Statista GmbH, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/411620/umfrage/anzahl-der-weltweiten-fluege/> (25.10.2023)
- ASTM International (2021): Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons D7566-21, West Conshohocken, PA
- ATAG (Air Transport Action Group) (2021): Waypoint 2050. Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century. [https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050\\_v2021\\_27sept\\_full.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf) (20.10.2023)
- 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)
- Batteiger, V.; DeBreuker, R.; Dedoussi, I.; Delfs, J.; Dinkelacker, F.; Elham, A.; Garcia, S.; Friedrichs, J.; Goertz, S.; Grawe, V.; Haije, W. et al. (2023): Accelerating the path towards carbon-free aviation. (Friedrichs, J.; Radespiel, R.; Werij, H.; Vos, R.) SE2A (Excellenzcluster Sustainable and Energy Efficient Aviation); NFL (Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt), Braunschweig, [https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Forschung/NFL/Accelerating\\_the\\_path\\_towards\\_carbon-free\\_aviation.pdf](https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Forschung/NFL/Accelerating_the_path_towards_carbon-free_aviation.pdf) (25.10.2023)

- 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)
- Bauhaus Luftfahrt (2022): Synthetic Jet Fuels and the Long Journey to Climate Neutrality. Livestream from ILA Berlin 2022. Weitere Beteiligte: Batteiger, V.; Habersetzer, A., VideoYoutube, <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=T3uMJXrlhJ4> (26.10.2023)
- BBC (2023): France bans short-haul flights to cut carbon emissions. <https://www.bbc.com/news/world-europe-65687665> (20.10.2023)
- BDL (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V.) (2016): Wie sicher ist Fliegen? <https://www.bdl.aero/de/publikation/wie-sicher-ist-fliegen/> (25.10.2023)
- BDL (2019): CO<sub>2</sub>- 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/> (25.10.2023)
- BDL (2021): Masterplan – Klimaschutz im Luftverkehr. Maßnahmen für einen CO<sub>2</sub>-neutralen Luftverkehr. <https://www.bdl.aero/de/themen-positionen/nachhaltigkeit/klimaschutz/> (25.10.2023)
- BDL (2022a): Klimaschutz im Luftverkehr. Analyse der Klimaschutzinstrumente im Luftverkehr zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. <https://www.bdl.aero/de/publikation/analyse-der-klimaschutzinstrumente-im-luftverkehr-zur-co2-reduktion/#:~:text=In%20Deutschland%20hat%20der%20innerdeutsche,auf%202023%20Prozent%20kommt> (25.10.2023)
- BDL (2022b): USA fördern alternative Flugkraftstoffe. <https://www.klimaschutz-portal.aero/meldung/usa-foerdern-alternative-flugkraftstoffe/> (25.10.2023)
- BDLI (Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V.) (2021): Annual Report 2021. Branchendaten der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie. Annual Report 2021 (25.10.2023)
- BDLI (2023): Branchendaten der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie für 2022. <https://www.bdli.de/meldungen/branchendaten-der-deutschen-luft-und-raumfahrtindustrie-fuer-2022> (25.10.2023)
- Beyers, B. (2023): Drei bis vier Mal teurer als fossiles Kerosin. Interview Harald Dialer, Chief Commercial Officer im Vorstand der HCS Group. Global Energy Solutions e. V., <https://global-energy-solutions.org/drei-bis-vier-mal-teurer-als-fossiles-kerosin/#> (27.10.2023)
- Bieler, C.; Sutter, D. (2019): Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland. Straßen-, Schienen-, Luft- und Binnenschiffverkehr 2017. INFRAS, <https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2019/08/190826-infras-studie-externe-kosten-verkehr.pdf> (20.10.2023)
- 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. Air Transport Action Group (ATAG), ICF, [https://aviationbenefits.org/media/167495/fueling-net-zero\\_september-2021.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167495/fueling-net-zero_september-2021.pdf) (20.10.2023)
- BMDV (Bundesministerium für Digitales und Verkehr) (2022): Klimaneutrale Luftfahrt, <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/klimaneutrale-luftfahrt.html> (1.11.2023)
- BMDV (2023): Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split in Deutschland. Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern in Deutschland. In: UBA (Umweltbundesamt), <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#anmerkung> (26.10.2023)
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz); BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur); BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie); BMZ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung); BDL (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](https://www.bdli.de/sites/default/files/2021-05/210507_PtL-Roadmap_f.pdf) (25.10.2023)

- BMVg (Bundesministerium der Verteidigung) (2022): Nachhaltigkeitsbericht 2022 des Bundesministeriums der Verteidigung und der Bundeswehr. Berichtszeitraum 2020-2021. Bonn, <https://www.bmvg.de/resource/blob/5561086/9aac6bb5bcd64e90a0552a3705878987/download-nachhaltigkeitsbericht-2022-data.pdf> (25.10.2023)
- BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. [https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (25.10.2023)
- BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2023a): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.html> (19.9.2023)
- BMWK (2023b): Durchbruch für ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien in der EU. Neue EU-Richtlinie für erneuerbare Energien von Mitgliedstaaten im Rat angenommen. 16.6.2023, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/06/20230616-neue-eu-richtlinie-fuer-erneuerbare-energien-angenommen.html> (25.10.2023)
- Boeing (2022a): Entwicklung des weltweiten Passagierflugverkehrs von 2012 bis 2041. Statista GmbH, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/311643/umfrage/flugverkehr-entwicklung-nach-rpk-weltweit/> (25.10.2023)
- Boeing (2022b): Prognostizierte Anzahl der weltweit eingesetzten Frachtflugzeuge in den Jahren 2019, 2020 und 2041. Statista GmbH, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/277562/umfrage/anzahl-eingesetzter-frachtflugzeuge-weltweit/> (25.10.2023)
- Boeing (2022c): World Air Cargo Forecast 2022-2041. [https://www.boeing.com/resources/boeingdot-com/market/assets/downloads/Boeing\\_World\\_Air\\_Cargo\\_Forecast\\_2022.pdf](https://www.boeing.com/resources/boeingdot-com/market/assets/downloads/Boeing_World_Air_Cargo_Forecast_2022.pdf) (20.10.2023)
- Bopst, J.; Herbener, R.; Hölzer-Schopohl, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Weiß, J. (2019a): Umweltschonender Luftverkehr. lokal-national-international. UBA, Texte 130/2019, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06\\_texte-130-2019\\_umweltschonender\\_luftverkehr\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06_texte-130-2019_umweltschonender_luftverkehr_0.pdf) (20.10.2023)
- 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. UBA, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba\\_fb\\_wohin-geht-die-reise.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_fb_wohin-geht-die-reise.pdf) (25.10.2023)
- 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 and Biorefining 16(5), S. 1227–1239
- BReg (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](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/220621-Klimaneutrale-Luftfahrt-Juni-22-Vfin-Anlage-BR.pdf?__blob=publicationFile&v=10) (25.10.2023)
- 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/> (25.10.2023)
- Bullerdiek, N.; Quante, G.; Bube, S.; Neuling, U. (2022): Non Drop-In Kraftstoffe im Luftverkehr. Ein gesamtsystemischer Vergleich von Nutzungs- und Einsatzmöglichkeiten. aireg, [https://www.researchgate.net/publication/358149982\\_Non\\_Drop-In\\_Kraftstoffe\\_im\\_Luftverkehr\\_-\\_Ein\\_gesamtsystemischer\\_Vergleich\\_von\\_Nutzungs-\\_und\\_Einsatzmoglichkeiten](https://www.researchgate.net/publication/358149982_Non_Drop-In_Kraftstoffe_im_Luftverkehr_-_Ein_gesamtsystemischer_Vergleich_von_Nutzungs-_und_Einsatzmoglichkeiten) (20.10.2023)
- Burstedde, A.; Koneberg, F. (2022): Fachkräftemangel im Flugverkehr. IW (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](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht_2022-Fachkr%C3%A4ftemangel-Luftfahrt.pdf) (25.10.2023)
- CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative) (2023): Alternative Jet Fuels (AJF) and Sustainable Aviation Fuel (SAF). <https://www.caafi.org/resources/faq.html#Alternative> (1.11.2023)
- Cabrera, E.; de Sousa, J. (2022): Use of Sustainable Fuels in Aviation-A Review. In: Energies 15(7)

- 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: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy 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)
- 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, [https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/20200507\\_Hydrogen-Powered-Aviation-report\\_FINAL-web-ID-8706035.pdf](https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/20200507_Hydrogen-Powered-Aviation-report_FINAL-web-ID-8706035.pdf) (25.10.2023)
- 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). Belfast, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2007-7849>
- 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)
- Dahlmann, K.; Matthes, S.; Niklass, M.; Plohr, M.; Scheelhaase, J.; Wozny, F. (2023): Klimawirkung des Luftverkehrs. Wissenschaftlicher Kenntnisstand, Entwicklungen und Maßnahmen. (Herbener, R.; Wetzel, F.; Köhler, K.; Linke, F.; Lau, A.) UBA (Umweltbundesamt), Dessau-Roßlau, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb\\_klimawirkung\\_des\\_luftverkehrs\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_klimawirkung_des_luftverkehrs_0.pdf) (30.1.2024)
- DEHSt (Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt) (2022): Treibhausgasemissionen 2021. Emissionshandelpflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2021), [https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (25.10.2023)
- Del Monte, D. M.; Cruz, P. L.; Dufour, J. (2022): SAF production from camelina oil hydrotreatment: A techno-economic assessment of alternative process configurations. In: Fuel 324(Part B)
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2023a): Anzahl der beförderten Personen im Luftverkehr in den Jahren 2004 bis 2022 in Deutschland. In Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12552/umfrage/befoerderte-personen-im-luftverkehr/> (25.10.2023)
- Destatis (2023b): 78 % mehr Reisen ins Ausland im Jahr 2022 als im Vorjahr, aber 13 % weniger als vor Corona. Pressemitteilung Nr. 279. 17.7.2023, [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/07/PD23\\_279\\_45.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/07/PD23_279_45.html) (25.10.2023)
- DFS (Deutsche Flugsicherung) (2022): Luftverkehr in Deutschland – Mobilitätsbericht 2021. (Friedmann, A.; Belz, C.), <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> (25.10.2023)
- 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) (25.10.2023)
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.) (2021a): 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/> (25.10.2023)
- DLR (2021b): DEPA 2050. Development Pathways for Aviation up to 2050 – Final Report. (Leipold, A.; Aptsiauri, G.; Ayazkhani, A.; Bauder, U.; Becker, R.-G.; Berghof, R.; Claßen, A.; Dadashi, A.; Dahlmann, K.; Dzikus, N.; Flüthmann, N.; Grewe, V.; Göhlich, L.; Grimme, W.; Günther, Yves; Jaksche,

R.; Jung, M.; Knabe, F.; Kutne, P.; Le Clercq, P.; Pabst, H.; Poggel, S.; Staggat, M.; Wicke, K.; Wolters, F.; Zanger, J.; Zill, T.), [https://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/aktuelles/DEPA2050\\_StudyReport.pdf](https://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/aktuelles/DEPA2050_StudyReport.pdf) (25.10.2023)

DLR (2022): Personenverkehr in Deutschland: Verkehrsmittel im Vergleich, <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/daten-und-fakten/personenverkehr-in-deutschland-verkehrsmittel-im-vergleich> (25.10.2023)

DLR (2023): 45 Millionen für Erprobung von Wasserstoff in der Luftfahrt. Luft- und Raumfahrtkoordinatorin übergibt Förderbescheid für fliegendes Wasserstofflabor. 12.5.2023, <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/02/luft-und-raumfahrtkoordinatorin-uebergibt-foerderbescheid-fuer-fliegendes-wasserstofflabor> (25.10.2023)

Egal, J.; Mauroschat, R.; Dardenne, J. (2023): Aviation Tax Cap. How much revenues are governments losing out on due to poor aviation taxation? July 2023. Transport & Environment, [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/07/tax\\_gap\\_report\\_July\\_2023.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/07/tax_gap_report_July_2023.pdf) (25.10.2023)

EK (Europäische Kommission) (2020a): Nachhaltige Flugzeugtreibstoffe – ReFuelEU Aviation. Veröffentlichte Initiativen, [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Nachhaltige-Flugzeugtreibstoffe-ReFuelEU-Aviation\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Nachhaltige-Flugzeugtreibstoffe-ReFuelEU-Aviation_de) (25.10.2023)

EK (2020b): Updated analysis of the non-CO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). Report from the Commission to the European Parliament and the Council. Commission Staff Working Document. Brüssel, [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:7bc666c9-2d9c-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_3&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:7bc666c9-2d9c-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF) (30.1.2024)

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 marktbasierter Mechanismus. COM(2021) 552 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021PC0552> (25.10.2023)

EK (2021b): Vorschlag für eine Verordnung der Europäischen Parlaments und des Rates zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr. COM(2021) 561 final, [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Nachhaltige-Flugzeugtreibstoffe-ReFuelEU-Aviation\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Nachhaltige-Flugzeugtreibstoffe-ReFuelEU-Aviation_de) (25.10.2023)

EK (2022): European Green Deal: new rules agreed on applying the EU emissions trading system in the aviation sector. 9.12.2022, [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_7609](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7609) (25.10.2023)

EP (Europäisches Parlament) (2019): CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luft- und Schiffsverkehrs: Zahlen und Fakten (Infografik), <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20191129STO67756/co2-emissionen-des-luft-und-schiffsverkehrs-zahlen-und-fakten-infografik> (25.10.2023)

EREA (Association of European Research Establishments in Aeronautics) (2020): EREA Future of Aviation – The Scenarios. Amsterdam

Eurocontrol (2022): Eurocontrol Aviation Outlook 2050. Main Report. April 2022, [https://www.eurocontrol.int/archive\\_download/all/node/13448](https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/13448) (25.10.2023)

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](https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/14263) (25.10.2023)

Faber, J.; Király, J.; Lee, D.; Owen, B.; O’Leary, A. (2022): Potential for reducing aviation non-CO<sub>2</sub> emissions through cleaner jet fuel. CE Delft, 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) (30.1.2024)

- FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2023): Flugtickets bleiben wegen knapper Kapazitäten teuer, <https://www.faz.net/aktuell/finanzen/meine-finanzen/geld-ausgeben/flugtickets-bleiben-wegen-knapper-kapazitaeten-teuer-19006747.html> (19.9.2023)
- Flughafenverband ADV (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen e. V.) (2023): Pressemitteilung Nr. 10/2023. Umfassende repräsentative Fluggastbefragung: Klarer Trend – Der Passagier wird jünger und Kurzreisen nehmen ab. 15.8.2023, <https://www.adv.aero/wp-content/uploads/2023/08/ADV-PM-10-2023-Umfassende-repr%C3%A4sentative-Fluggastbefragung-Klare-Trends.pdf> (20.10.2023)
- Forbes, J. (2019): Types Of Electric Airport Ground Support Equipment. Flux Power, <https://www.fluxpower.com/blog/types-of-electric-airport-ground-support-equipment> (25.10.2023)
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (2020): Flugverhalten in Deutschland und Europa. Ergebnisse einer repräsentativen Befragung der deutschen Bevölkerung. (Berneiser, J.; Senkpiel, C.; Kustermann, M.; Gölz, S.), [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/Ergebnisse\\_Flugstudie.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/Ergebnisse_Flugstudie.pdf) (20.10.2023)
- 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)
- Gipson, L. (2023): About Sustainable Flight Demonstrator Project. NASA (National Aeronautics and Space Administration), <https://www.nasa.gov/directorates/armd/integrated-aviation-systems-program/armd-iasp-sfd/about-sustainable-flight-demonstrator-project/> (25.10.2023)
- Gössling, S.; Humpe, A. (2020): The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. In: Global Environmental Change 65
- Graver, B. (2022): Polishing my crystal ball: Airline traffic in 2050. ICCT (International Council on Clean Transportation), <https://theicct.org/global-aviation-airline-traffic-jan22/> (25.10.2023)
- Graver, B.; Zhang, K.; Rutherford, D. (2019): Total passenger kilometers from air travel, 2018. ICCT, [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_CO2-commercl-aviation-2018\\_20190918.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf) (25.10.2023)
- Graver, B.; Zheng, X.; Rutherford, D.; Mukhopadhyaya, J.; Pronk, E. (2022): Vision 2050. Aligning Aviation with the Paris Agreement. ICCT, Washington, DC, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/Aviation-2050-Report-A4-v6.pdf> (25.10.2023)
- HAW (Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg) (2021): Umweltschutz in der Luftfahrt: Hintergründe und Argumente zur aktuellen Diskussion (Scholz, D.), [https://deposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/11261/1/AERO\\_RR\\_UmweltschutzLuftfahrt\\_2021-07-03.pdf](https://deposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/11261/1/AERO_RR_UmweltschutzLuftfahrt_2021-07-03.pdf) (25.10.2023)
- Heib, S.; Hildebrand, J. (2022): SynFuels-Akzeptanz – Bedingungen und Einflussfaktoren. AP 6 – Akzeptanzforschung. Statuskonferenz der Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr. BEniVer (Begleitforschung Energiewende im Verkehr), Berlin
- Hoet, E. (2020): Was bedeutet Net Zero wirklich? Ist Net Zero gleichbedeutend mit klimaneutral? Und was meinen Unternehmen, wenn sie klimaneutral, klimapositiv oder CO2-frei sagen? Eine Begriffserklärung von Emilien Hoet, Head of UK, ClimatePartner. ClimatePartner, [https://www.climatepartner.com/de/climate-action-insights/was-bedeutet-netzero-wirklich](https://www.climatepartner.com/de/climate-action-insights/was-bedeutet-net-zero-wirklich) (25.10.2023)
- Hyiji, K.; Teter, J.: Aviation. Tracking report – September 2022, <https://www.iea.org/reports/aviation> (25.10.2023)
- IATA (International Air Transport Association): Fact Sheet 2. Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification, <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf> (25.10.2023)
- IATA (2015): IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap. 1st Edition, <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/safr-1-2015.pdf> (25.10.2023)

- IATA (2018): Prognostizierte Anzahl der weltweiten Flugpassagiere in den Jahren 2017 bis 2037. Statista GmbH, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/374860/umfrage/flugverkehr-entwicklung-passagiere-weltweit/> (25.10.2023)
- IATA (2022): Number of flights performed by the global airline industry from 2004 to 2021, with forecasts until 2023. Statista GmbH, <https://www.statista.com/statistics/564769/airline-industry-number-of-flights/> (25.10.2023)
- IATA (2023a): Air Passenger Market Analysis. Domestic traffic fully recovers to pre-pandemic levels. April 2023, <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-market-analysis-april-2023/> (25.10.2023)
- IATA (2023b): IATA Annual Safety Report – 2022. Executive Summary and Safety Overview. Edition 59, <https://www.iata.org/contentassets/a8e49941e8824a058fee3f5ae0c005d9/safety-report-executive-and-safety-overview.pdf> (25.10.2023)
- IATA (2023c): Worldwide air freight traffic from 2004 to 2021, with an estimate for 2022 and 2023. Statista GmbH, <https://www.statista.com/statistics/564668/worldwide-air-cargo-traffic/> (25.10.2023)
- ICAO (International Civil Aviation Organization) (2022a): Environmental Trends in Aviation to 2050. (Fleming, G.; de Lépinay, I.; Schaufele, R.), [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\\_Art7.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art7.pdf) (25.10.2023)
- ICAO (2022b): Innovation for a green transition. 2022 Environmental Report, <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO%20ENV%20Report%202022%20F4.pdf> (25.10.2023)
- ICCT (2023): ICAO's 2050 net-zero CO2 goal for international aviation. (Mithal, S.; Rutherford, D.), <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/global-aviation-ICAO-net-zero-goal-jan23.pdf> (25.10.2023)
- IEA (International Energy Agency) (2019): Aviation fuel consumption in the Sustainable Development Scenario, 2025–2040, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/aviation-fuel-consumption-in-the-sustainable-development-scenario-2025-2040> (25.10.2023)
- Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (2019): Evaluation des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo). Zusammenfassung zentraler Ergebnisse und Handlungsempfehlungen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). (Wangler, L.; Kerlen, C.; Bräuninger, M.; Meyer, S.; Teuber, M.-O.) Berlin, [https://www.iit-berlin.de/iit-docs/c3f28e097a334bacb71065bcfb94f056\\_Kurzfassung%20LuFo\\_BMWi.pdf](https://www.iit-berlin.de/iit-docs/c3f28e097a334bacb71065bcfb94f056_Kurzfassung%20LuFo_BMWi.pdf) (26.10.2023)
- 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.) Genf, [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf) (25.10.2023)
- IW (Institut der Deutschen Wirtschaft) (2023): CO2-Preis steigert Kosten für die Industrie. (Bardt, H.; Schaefer, T.) IW-Kurzbericht 66/2023, [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) (20.10.2023)
- Kirchgeßner, K. (2022): Klimafreundlich fliegen: Woran die Forschung tüftelt. Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. <https://www.helmholtz-klima.de/aktuelles/klimafreundlich-fliegen> (19.9.2023)
- 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)
- Königs, L. (2021): CO2-Kompensation – was bringen eigentlich die Programme der Airlines? TRAVELBOOK.de, <https://www.travelbook.de/fliegen/airlines/airlines-flug-kompensieren> (25.10.2023)
- 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

- 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/> (25.10.2023)
- 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
- Lukic, M.; Giangrande, P.; Hebala, 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): Jenseits von Schweben. In: *manager-magazin.de* (7), S. 60–65
- Margetta, R. (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> (25.10.2023)
- 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
- Miller, J.; Hafestine, 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
- 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/> (25.10.2023)
- 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](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-04-16_NWR-Stellungnahme_Luftverkehr.pdf) (25.10.2023)
- Niklaß, M. (2019): Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftfahrt. Technische Universität Hamburg, Hamburg, [https://elib.dlr.de/126415/1/DLR-FB-2019-06\\_Doktorarbeit-MalteNikla%C3%9F\\_final.pdf](https://elib.dlr.de/126415/1/DLR-FB-2019-06_Doktorarbeit-MalteNikla%C3%9F_final.pdf) (25.10.2023)
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2022): A Roadmap Toward a Sustainable Aviation Ecosystem. (Oakleaf, B.; Cary, S.; Meeker, D.; Arent, D.; Farrell, J.; Day, M.; McCormick, R.; Abdullah, Z.; Young, S.; Cochran, J.; Gearhart, C.), <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83060.pdf> (25.10.2023)
- Öko-Institut e. V. (o. J.): Wie wirken Flugemissionen? <https://fliegen-und-klima.de/wie-wirken-flugemissionen.html> (25.10.2023)
- Öko-Institut e. V. (2020a): Factsheet 1: Klimaschädliche Wirkungen des Luftverkehrs. (Siemons, A.; Motschall, M.; Graichen, J.; Brunn, C.) Factsheet Fliegen und das Klima 1, [https://fliegen-und-klima.de/downloads/Factsheet\\_1\\_klimaschaedliche\\_Wirkungen.pdf](https://fliegen-und-klima.de/downloads/Factsheet_1_klimaschaedliche_Wirkungen.pdf) (25.10.2023)
- Öko-Institut e. V. (2020b): Factsheet 5: Die Zukunftsperspektiven. (Siemons, A.; Cames, M.; Motschall, M.; Schneider, L.) Factsheet Fliegen und das Klima 5, [https://fliegen-und-klima.de/downloads/Factsheet\\_5\\_Zukunft.pdf](https://fliegen-und-klima.de/downloads/Factsheet_5_Zukunft.pdf) (25.10.2023)
- Oliver Wyman (2022): Projected size of the global aircraft fleet due to coronavirus outbreak from 2020 to 2032. Statista GmbH, <https://www.statista.com/statistics/282237/aircraft-fleet-size/> (25.10.2023)
- 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> (25.10.2023)

- 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
- Pilz, D. (2023): Flug-Kompensation: Fliegen mit reinem Gewissen? FP Passenger Service, <https://www.fairplane.de/ratgeber/flug-kompensation/> (25.10.2023)
- 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(14)
- Qazi, U. (2022): Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications; Challenges and Expected Opportunities. In: Energies 15(13)
- Ranasinghe, K.; Guan, K.; Gardi, A.; Sabatini, R. (2019): Review of advanced low-emission technologies for sustainable aviation. In: Energy 188, S. 115945
- Rat der Europäischen Union (2023a): Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors: Einigung zwischen Rat und Parlament. 25.4.2023, <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/04/25/council-and-parliament-agree-to-decarbonise-the-aviation-sector/> (25.10.2023)
- Rat der Europäischen Union (2023b): Infografik – „Fit für 55“: für mehr umweltfreundliche Kraftstoffe im Flug- und Seeverkehr, <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/> (25.10.2023)
- Rennert, K.; Erickson, 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: Zeitschrift für Wirtschaftspolitik 103(2), S. 118–122
- Schulz, J. (2020): CO2-Kompensation bei Flügen: Kosten unterscheiden sich je nach Anbieter. Deutschlandfunk, <https://www.deutschlandfunk.de/co2-kompensation-bei-fluegen-kosten-unterscheiden-sich-je-100.html> (25.10.2023)
- Schwan, B. (2023): Neues aus dem Flugzeugbau: NASA will Fliegen radikal spritsparender machen. Heise Medien, <https://www.heise.de/hintergrund/Neues-aus-dem-Flugzeugbau-NASA-will-Fliegen-radikal-spritsparender-machen-9202594.html> (25.10.2023)
- Seifert, A. (2023): Wieso Kerosin und Flugreisen bisher nicht versteuert werden. MDR (Mitteldeutscher Rundfunk), <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/wirtschaft/fliegen-klimaschutz-steuer-kerosin-tickets-100.html> (25.10.2023)
- SESAR (2020): European ATM Master Plan – Executive View. Digitalising Europe’s Aviation Infrastructure. 2020 edition. Luxemburg, <https://op.europa.eu/o/opportunities-service/download-handler?identifier=8afa1ad9-aac4-11ea-bb7a-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=celar&part> (25.10.2023)
- Shahriar, M.; Khanal, A. (2022): The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). In: Fuel 325
- 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> (25.10.2023)
- SPD, B90/Grüne, FDP (2021): Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/1f422c60505b6a88f8f3b3b5b8720bd4/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1> (25.10.2023)

- Statista GmbH (2022a): Luftfrachtverkehr. Statistik-Report zur weltweiten Luftfrachtbeförderung, <https://de.statista.com/statistik/studie/id/85941/dokument/weltweiter-luftfrachtverkehr/> (25.10.2023)
- Statista GmbH (2022b): Luftverkehrsbranche Deutschland. Statistik-Report zur Luftverkehrsbranche in Deutschland, <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6562/dokument/luftverkehrsbranche-deutschland-statista-dossier/> (25.10.2023)
- Statista GmbH (2023): Anzahl der Privatjet-Flüge von deutschen Flughäfen in den Jahren von 2019 bis 2022. In Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1361311/umfrage/anzahl-der-privatjet-fluege-von-deutschen-flughafen/> (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.) Themenkurzprofil 53, Berlin, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000143463> (25.10.2023)
- Tagesschau.de (2023a): Distanzen der Privatjet-Flüge von deutschen Flughäfen im Jahr 2022. In Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1361353/umfrage/distanzen-der-privatjet-fluege-von-deutschen-flughafen/> (25.10.2023)
- Tagesschau.de (2023b): Flugtickets bleiben wohl teuer, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/flugreise-ticketpreise-luftverkehr-100.html> (25.10.2023)
- 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
- Transport & Environment (2021): Private jets: can the super rich supercharge zero-emission aviation? (Murphy, A.; Simon, V.; Earl, T.; Todts, W.) (25.10.2023)
- 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) (Hg.): AIAA Meeting Paper. 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO). Hilton Head, South Carolina, 21.–23. September 2009, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2009-6956> (26.10.2023)
- UBA (Umweltbundesamt) (2018): Freiwillige CO2-Kompensation durch Klimaschutzprojekte. (Wolters, S.; Schaller, S.; Götz, M.) Ratgeber, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/ratgeber\\_freiwillige\\_co2\\_kompensation\\_final\\_internet.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/ratgeber_freiwillige_co2_kompensation_final_internet.pdf) (26.10.2023)
- UBA (2020): Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. Abschlussbericht. (Allekotte, M.; Bergk, F.; Biemann, K.; Deregowski, C.; Knörr, W.; Althaus, H.-J.; Sutter, D.; Bergmann, T.), [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_156-2020\\_oekologische\\_bewertung\\_von\\_verkehrsarten\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2020_oekologische_bewertung_von_verkehrsarten_0.pdf) (26.10.2023)
- UBA (2021): Luftverkehr im EU-ETS und CORSIA im „Fit for 55“ – Paket. Vorschlag der EU-Kommission vom 14.07.2021. (Verena Graichen)
- Van Dyk, S.; Saddler, J. (2021): Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges. IEA Bioenergy Task 39
- VDR (Verband Deutsches Reisemanagement e. V.) (2022): VDR-Geschäftsanalyse 2022. <https://www.vdr-service.de/fileadmin/services-leistungen/fachmedien/geschaeftsreiseanalyse/VDR-Geschaeftsreiseanalyse-2022.pdf> (26.10.2023)
- Wagener, L. (2019): Was ist eigentlich CO2? Definition, Entstehung & Einfluss aufs Klima. co2online, <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/klimawandel/was-ist-co2/> (26.10.2023)
- Wagner, E.; Jacques, D.; Blake, W.; Pachter, M. (2002): Flight Test Results of Close Formation Flight for Fuel Savings. In: AIAA Meeting Paper. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Monterey, 5.-8. August 2002. In: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)

- Walker, A. (2020): Guest Editorial: Johnson Matthey Technology Review Special Edition on Clean Mobility. In: Johnson Matthey Technology Review 64(3), S. 234
- 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
- World Economic Forum (2022): Clean Skies for Tomorrow: Delivering on the Global Power-to-Liquid Ambition. Insight Report. Genf, <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/aerospace%20and%20defense/our%20insights/clean%20skies%20for%20tomorrow%20delivering%20on%20the%20global%20power%20to%20liquid%20ambition/clean-skies-for-tomorrow-delivering-on-the-global-power-to-liquid-ambition.pdf> (26.10.2023)
- YouGov (2022): Wie wahrscheinlich ist es, dass Sie in den kommenden 12 Monaten aufgrund der Preisansteige bei den Flugtickets das Fliegen einschränken werden? In Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1340489/umfrage/flugbereitschaft-bei-hohen-ticketpreisen/> (26.10.2023)
- YouGov (2023): Haben Sie schon einmal bei Antritt einer Flugreise Flugscham empfunden, also Scham in Bezug auf die Benutzung von Verkehrsflugzeugen? In Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1104251/umfrage/umfrage-zur-flugscham-von-reisenden-aus-deutschland-nach-altersgruppen/> (26.10.2023)
- Zentrum Liberale Moderne (2023): Roadmap Klimaneutrales Fliegen (2.0). Zwischenergebnisse aus einem Dialog von Politik und Wirtschaft von Ralf Fücks, Matthias von Ransom und Volker Thum (Fücks, R.; v. Ransom, M.; Thum, V.). [https://libmod.de/wp-content/uploads/LibMod\\_Roadmap\\_klimaneutrales-Fliegen.pdf](https://libmod.de/wp-content/uploads/LibMod_Roadmap_klimaneutrales-Fliegen.pdf) (19.9.2023)



## 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. (BDLI)
Stefan Berndes	Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V. (BDLI)
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 (IFAS)
Roland Gerhards	Hamburg Aviation/ZAL
Wolfgang Grimme	DLR-Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr
Andreas Gundel	bavAIRia e. V.
Peter Kasten	Stv. 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 (LBST)
Robert Schreiber	Deutsche Aircraft GmbH
Dieter Scholz	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)
Peter Schwarz	bavAIRia e. V.

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

### 9.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Optionen zur Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt	22
Abb. 2: Forschungsförderung von Technologievorhaben der zivilen Luftfahrt – Förderung von Einzelvorhaben des BMWK	32
Abb. 3: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte der Teilbranche 303 Luft- und Raumfahrzeugbau	33
Abb. 4: Clusterinitiativen in der Luftfahrt in Deutschland	34
Abb. 5: Weltweite Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens	37
Abb. 6: Indirekte Innovationsschwerpunkte des klimaverträglicheren Fliegens (weltweit)	38
Abb. 7: Relation der deutschen Beteiligung an den Aktivitäten im Vergleich zur Gesamtmenge	39
Abb. 8: Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten	40
Abb. 9: Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten	41
Abb. 10: Direkte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten deutscher Akteure	41
Abb. 11: Top-10-Akteure in Deutschland	42
Abb. 12: Indirekte Themenschwerpunkte in allen CORDIS-Projekten mit deutscher Beteiligung	43
Abb. 13: Synthese – Technologieschwerpunkte für die beiden Bereiche Kraftstoffe und Antriebskonzepte für einen klimafreundlicheren Luftverkehr	43
Abb. 14: Winglet-Design	51
Abb. 15: Blended Wing Body-Design	51
Abb. 16: Technologiepfade und Beiträge zur Klimaneutralität	57

### 9.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems	10
Tab. 2: Klimawirkungen der Luftfahrt	17
Tab. 3: Vorgesehene Maßnahmen für einen Beitrag der Luftfahrt zum Klimaschutz	24
Tab. 4: Nachhaltige Flugzeugkraftstoffe, ihre jeweiligen Ausgangsrohstoffe und Beimischungsverhältnisse	45
Tab. 5: Überblick über Zeithorizonte und Technologieverfügbarkeit in der Luftfahrt	56
Tab. 6: Sicherheit und weitere Parameter verschiedener Energieträger (qualitativer Vergleich)	61

### 9.4 Abkürzungsverzeichnis

ATFM	Air Traffic Flow Management
BWB	Blended Wing Body-Design
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
EU-EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
ATM	Flugverkehrsmanagement (engl. Air Traffic Management)
FTK	Frachttonnenkilometer
IATA	International Air Transport Association
ICAO	Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (engl. International Civil Aviation Organization)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramm
MRV	MRV-Pflicht (aus dem Englischen: monitoring, reporting, verification)
SAF	Nachhaltige Flugkraftstoffe (engl. Sustainable Aviation Fuels)
PKM	Personenkilometer
PtL	Power-to-Liquid
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UNFCCC	Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (engl. United Nations Framework Convention on Climate Change)
WET	Water-enhanced Turbofan





# Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren Luftverkehr



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



## **Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren 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](mailto:buero@tab-beim-bundestag.de)  
Web: [www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de)

2024

Gestaltung: VDI/VDE-IT

Umschlagbild: xx

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.

# 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 CO<sub>2</sub>- und Nicht-CO<sub>2</sub>-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 FuE-Aktivitäten 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, Unterstützung 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 sowohl im Passagier- als auch im 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den internationalen Luftverkehr von und nach Deutschland und 0,33 % durch den inländischen Luftverkehr verursacht. Rund 1,5 % der gesamten, seit 1940 durch Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auf die Luftfahrt zurückzuführen. Allerdings steht CO<sub>2</sub> nur für rund ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs. Die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte – Rußpartikel, Wasserdampf, Schwefel- und Stickoxide (NO<sub>x</sub>), 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 CO<sub>2</sub> als am stärksten einzuschätzen. Die Klimawirkung variiert zudem in Abhängigkeit von den zurückgelegten Strecken, den Reiseflughöhen sowie den eingesetzten Flugzeugen.

Historisch betrachtet sind sowohl der Passagier- wie auch der 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. Im Jahr 2050 könnten bereits 60 % mehr CO<sub>2</sub>-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 (engl. International Civil Aviation Organization, ICAO) und der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (engl. 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 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.

### *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 im Jahr 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 in den Jahren 2016 bis 2020 relativ konstant bei rund 150 Mio. Euro befunden hat und seit 2021 ein deutlicher Anstieg auf rund 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, 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 (engl. Sustainable Aviation Fuels; SAF) sind nicht auf Erdöl basierende Kraftstoffe, die als Kerosinalternativen entwickelt werden, um die CO<sub>2</sub>-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 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.

Elektrotreibstoffe (engl. 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 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in synthetische Kraftstoffe hergestellt (Power-to-Liquid-Verfahren). 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 Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) in Wasser (H<sub>2</sub>O) 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 Düsentriebwerke 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 oben diskutierten Antriebstechnologien gehören die potenzielle Reduzierung von TGH-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.

Darüber hinaus spielt die Optimierung des Flugbetriebs eine wesentliche Rolle. So könnten beispielsweise nicht nur die hohen Kraftstoffkosten von E-Fuels abgefedert und die spezifischen CO<sub>2</sub>-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 Flügel spitzen (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 (ATM, Air Traffic Management) 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 fortgeschrittenen 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 (digitaler 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 könnte. 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-CO<sub>2</sub>-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 vergleichsweisen 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.

Tab. 1: Stärken und Schwächen des deutschen Luftfahrtinnovationssystems

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

Eigene Darstellung

#### *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 & Claim-Konzepte, also Zertifikate für die Nutzung von SAF, die Fluggesellschaften erwerben können, unterstützt werden. Die Wertschöpfungs- bzw. Lieferkette von SAF könnte 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.

Kurzfristig könnten die bestehenden Netzwerke von Innovationstreibern durch die Technologieförderung, insbesondere im Rahmen des 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 Deutschland eine erhebliche Zunahme der durchgeföhrten 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 sowohl über eine Besteuerung bzw. den Emissionshandel als auch 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 darüberhinausgehende 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 Expert/inneninterviews 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 Expert/innenworkshop diskutiert, validiert und ergänzt. Danach konnte der Zuschnitt der zentralen politischen Handlungsfelder ermittelt werden. Ergänzt um Ergebnisse 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 umfasst das einleitende 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) behandelt. Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit neuen Entwicklungen ist ein Technologiemarketing, 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 Technologiemarketing 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 Entscheidern/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. 1).





# Das TAB in den Jahren 2021 und 2022

Deutscher Bundestag  
Ausschuss für Bildung, Forschung  
und Technikfolgenabschätzung  
Ausschussdrucksache  
20(18)217

---

## Inhalt

Zwei Jahre in Zahlen	3
Editorial	4
TA-Untersuchungen	5
Abgeschlossene TA-Projekte 2021	5
TA-Methodenstudie	6
Abgeschlossene TA-Projekte 2022	7
Themenfindungsrunden	13
Horizon-Scanning	14
Themenkurzprofile	14
Dialogveranstaltungen und repräsentative Befragungen	16
TA im Dialog: Impfungen und Gene Drives gegen Malaria	16
Öffentliche Fachgespräche	17
Präsentationen in Ausschusssitzungen	18
Erhebungen von Stakeholderperspektiven	19
Internationale Zusammenarbeit	20
Weiterentwicklung der (digitalen) Wissenschaftskommunikation	22
Die Berichterstattergruppe TA	26
Das TAB	27

---

## Zwei Jahre in Zahlen

**17 Berichte** mit insgesamt 3.866 Seiten veröffentlicht

**12 Kurzfassungen** zu den Berichten (TAB-Fokus; in deutscher und englischer Sprache) veröffentlicht

**18 Themenkurzprofile** à ca. 10 Seiten veröffentlicht

**2 Themenfindungsrunden** für alle Ausschüsse und Fraktionen des Bundestages

**16 Besprechungen** im Kreis der Berichterstattergruppe Technikfolgenabschätzung

**8 Beiträge** im neu eingerichteten TABlog

**7 Mio.** Zugriffe auf die Webseite – über **40.000 unterschiedliche Besucher/innen** jährlich

Verdopplung der Twitter-Followerzahlen

**3 TAB-Brief-Ausgaben** als neues Newsletter-Angebot im Jahr 2022

**12 Erwähnungen** des TAB in Bundestagsdrucksachen

## Editorial

An den im Folgenden dokumentierten Aktivitäten des TAB wird deutlich, wie sehr das Jahr 2021 noch von der Coronapandemie und ihren Auswirkungen auf das gesellschaftliche Leben geprägt war: Keine einzige Präsenzveranstaltung konnte durchgeführt werden, selbst die Berichterstattergespräche erfolgten zum größten Teil als Videokonferenzen.

Dies änderte sich im Berichtsjahr 2022, so dass im Oktober die EPTA-Jahreskonferenz mit mehr als 150 Abgeordneten und Wissenschaftler/innen aus Deutschland und 16 weiteren Ländern im großen Anhörungssaal stattfinden konnte. Dies war fraglos ein inhaltliches und kommunikatives Highlight der TA-Aktivitäten im Deutschen Bundestag in den letzten Jahren, getragen von der guten Zusammenarbeit des TAB mit dem Sekretariat des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung und der Berichterstattergruppe TA unter Leitung des Ausschussvorsitzenden. Der Blick auf die Veranstaltungen und den Dialog zwischen politischen und gesellschaftlichen Akteuren bildet daher auch

einen gewissen Schwerpunkt der folgenden Darstellung.

Das Kerngeschäft war wie immer die Durchführung der TA-Projekte und Kurzstudien sowie des Horizon-Scannings. Auf deren breitgefächerte Ergebnisse kann nicht detaillierter eingegangen werden, aber ihre Vielfalt sollte auch in einer Kurzdarstellung deutlich werden. Zudem lohnt sich der Blick bzw. Klick auf unsere Website, wo sich ausführlichere Informationen finden lassen.

In der Verteilung der 2021 und 2022 zum Abschluss gebrachten Projekte drückt sich auch eine zentrale Rahmenbedingung der Arbeit des TAB und des Ausschusses in den beiden Jahren aus: Durch die Neuwahl des Bundestages im September 2021 konnte nur eine kleinere Zahl von Berichten verabschiedet werden, wohingegen im Jahr 2022 die neuberufene Berichterstattergruppe TA unter dem neuen Vorsitzenden die ausstehenden Abnahmen vorliegender Berichtsentwürfe zügig anging, so dass in diesem Jahr besonders viele Ergebnisse veröffentlicht wurden.

Etwas ausführlicher beschrieben werden im Folgenden der umfassende Relaunch der Website des TAB und die dabei neu etablierten digitalen Formate, insbesondere der TAB-Brief als elektronischer Newsletter und der TABlog, sowie der Ausbau der Social-Media-Aktivitäten – wichtige Schritte der Aktualisierung und Erneuerung der Außen darstellung der TA beim Deutschen Bundestag, die dann im Zuge der Neubewerbung und -beauftragung 2023 weitergeführt und ausgebaut wurden.

Auch der vorliegende Tätigkeitsbericht 2021/2022 hat gegenüber seinen Vorgänger ausgaben einen weiteren Schritt in Richtung einer systematischeren Nutzung des Online angebots des TAB gemacht.

Wir danken für Ihr Interesse an unserer Arbeit und wünschen viel Spaß beim Lesen (und Klicken).

*Armin Grunwald und Arnold Sauter*

## TA-Untersuchungen

Die Kernaufgabe des TAB bilden die Untersuchungen im Bereich der Technikfolgenabschätzung (TA), die sich der Analyse komplexer Themen der Wissenschafts- und Technikentwicklung widmen. Das Portfolio der insgesamt 16 abgeschlossenen TA-Projekte in den Jahren 2021 und 2022 ist das Ergebnis einer Verständigung aller Fraktionen des Bundestages.

### Abgeschlossene TA-Projekte 2021

#### Genome Editing am Menschen

Genome Editing bezeichnet die jüngste Generation gentechnischer Verfahren, darunter das Werkzeug CRISPR/Cas9, dessen Entdeckung 2020 mit einem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Die Anwendung von Genome Editing am Menschen weckt Hoffnungen auf neue medizinische Therapien. Mit der Möglichkeit von Keimbahninterventionen, also dauerhaften, vererbaren Eingriffen in das menschliche Genom, stellen sich aber auch grundsätzliche ethische Fragen. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 191](#) bietet einen umfassenden, interdisziplinären Überblick über die Diskussion zum Thema Genome Editing am Menschen.



#### Nachhaltigkeitsbewertung landwirtschaftlicher Systeme – Herausforderungen und Perspektiven

Seit Jahren gibt es in Deutschland und anderen Ländern eine breite und kontroverse Diskussion, welche Art der Landbewirtschaftung ökologisch, sozial und ökonomisch am nachhaltigsten ist und wie Fortschritte in Richtung Nachhaltigkeit erzielt werden können. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 188](#) untersucht die Möglichkeiten einer vergleichenden Nachhaltigkeitsbewertung landwirtschaftlicher Systeme, um differenziertere Informationen zur landwirtschaftlichen Nachhaltigkeit zu generieren.



## **Digitalisierung der Landwirtschaft**

Die Landwirtschaft ist ein hochtechnisierter Wirtschaftsbereich, dessen Produktionsverfahren auf der Nutzung natürlicher Ressourcen und der Haltung von Tieren beruhen. Wie die steigenden Anforderungen an Klimaschutz, Nachhaltigkeit sowie das Tierwohl mit der Aufgabe der Ernährungssicherung zu vereinbaren sind, ist dabei eine höchst virulente Frage. Digitale Innovationen, welche eine hochpräzise, datengesteuerte Landwirtschaftsproduktion ermöglichen sollen, haben Hoffnungen geweckt, dieses Spannungsfeld besser austarieren zu können. Bereits 2005 war die Präzisionslandwirtschaft Thema einer TAB-Untersuchung – die [TAB-Arbeitsberichte Nr. 193](#) sowie [Nr. 194](#) bieten einen aktualisierten Überblick über den Stand der Digitalisierung in der Landwirtschaft und die damit verbundenen gesellschaftlichen Perspektiven und Herausforderungen.

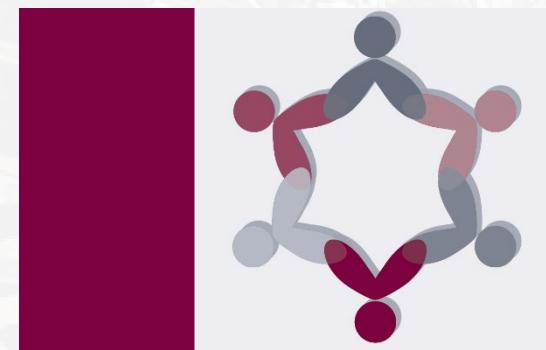



---

## **TA-Methodenstudie**

### **Nutzenpotenziale innovativer und partizipativer methodischer Verfahren für den Deutschen Bundestag**

Die parlamentarische Technikfolgenabschätzung (TA) setzt seit ihrem Entstehen partizipative Verfahren ein, um in den Analysen des wissenschaftlich-technischen Wandels und seiner gesellschaftlichen Folgen möglichst viel Wissen und unterschiedliche Sichtweisen einzubeziehen. Eine Stärkung des gesellschaftlichen Dialogs mittels partizipativer Verfahren erscheint dringend geboten, da Fragen der Folgenabschätzung technischer Innovation immer wieder im Zentrum erheblicher gesellschaftlicher Meinungsunterschiede stehen. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 192](#) stellt ausgewählte innovative Partizipationsverfahren vor und erörtert ihr Nutzenpotenzial für die parlamentarische TA im Deutschen Bundestag.



---

## Abgeschlossene TA-Projekte 2022

### Urbaner Holzbau

Holzhäuser wurden bis in die 1990er Jahre überwiegend in ländlichen Regionen oder stadtnahen Randgebieten als Ein- oder Zweifamilienhäuser errichtet. Erst in jüngster Zeit zeigen sich eine Renaissance und Weiterentwicklung des Holzbau. Die [TAB-Kurzstudie Nr. 3](#) gibt einen Überblick über den Status quo und Perspektiven des urbanen Holzbau in Deutschland sowie der hier relevanten Rahmenbedingungen und der Akteure in der Wertschöpfungskette. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht die Analyse von fördernden und hinderlichen Faktoren in den Einflussphären von Gesellschaft, Wirtschaft, Technik, Politik und Recht.



### Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft

Der große Bedarf an bezahlbarem Wohnraum stellt eine enorme nationale Herausforderung dar, die ohne eine leistungsfähige und innovative Bauwirtschaft nicht zu bewältigen ist. Von der Digitalisierung und Automatisierung der Bauprozesse werden wesentliche Impulse für eine effizientere Durchführung von Bauprojekten erwartet. Welche (digital)technischen Neuerungen befinden sich in Entwicklung, welche werden erprobt oder bereits eingesetzt? Im [TAB-Arbeitsbericht Nr. 199](#) werden relevante Trends in Bezug auf Technologie-, Produkt- und Prozessinnovationen in der Baubranche analysiert und Handlungsfelder für einen grundlegenden Strukturwandel identifiziert, um den Innovationsstau der Branche zu überwinden.



## Energiespareffekte im Gebäudesektor

Etwa 35 % des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs entfallen auf Gebäude. Der größte Anteil des Energieverbrauchs in Gebäuden für Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung und Kühlung entfällt auf Wohnhäuser. Aus energie- und klimapolitischer Sicht kommt der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich hohe Bedeutung zu. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 200](#) zu Energiespareffekten und zu Kosten und Nutzen der energetischen Gebäudesanierung zeigt auf, was Immobilieneigentümer/innen zum Ressourcen- und Geldsparen tun können und wie der Staat ihnen dabei helfen kann.



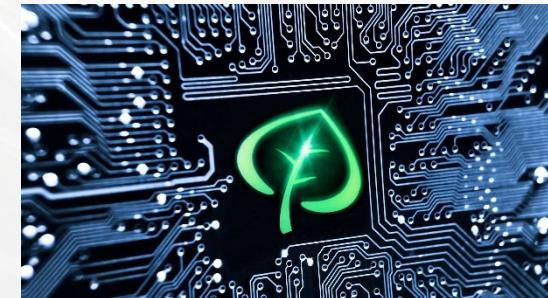
## Chancen der digitalen Verwaltung

Die Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung ist mit hohen Erwartungen verbunden. Dies trifft vor allem auf die Innovations- und Technologiefelder der künstlichen Intelligenz (KI) und der Distributed-Ledger-Technologie (DLT) zu. Mit KI-Technologien werden selbstständig und datenbasierte Entscheidungsprozesse verbunden, deren vielfältige Einsatzszenarien insgesamt in einer Erhöhung der Effektivität, Qualität und Sicherheit von Verwaltungsprozessen resultieren können. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 201](#) zeigt vor dem Hintergrund internationaler Praxisbeispiele Perspektiven für eine gelingende Digitalisierung der Verwaltung in Deutschland auf.



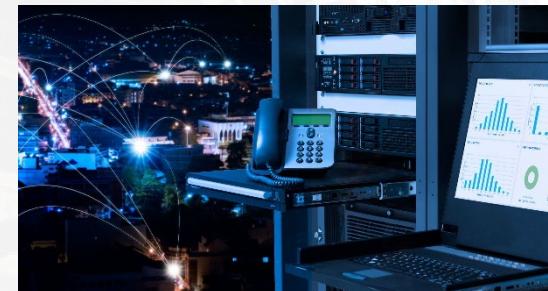
## Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur

Bislang werden der digitale Umbruch und die damit verbundenen Chancen und Risiken in Wissenschaft und breiter Öffentlichkeit vor allem in wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Hinsicht thematisiert. Die Digitalisierung geht aber auch mit erheblichen ökologischen Wirkungen einher, die als ambivalent einzuschätzen sind: Auf der einen Seite bietet sich die Chance, ökonomische und gesellschaftliche Prozesse neu zu organisieren und insbesondere auch ressourcen- und energieeffizienter zu gestalten. Auf der anderen Seite verbrauchen Aufbau und Betrieb der digitalen Infrastrukturen (Endgeräte, Rechenzentren und Telekommunikationsnetze) große Mengen an Energie und Rohstoffen. Im [TAB-Arbeitsbericht Nr. 198](#) werden unter Berücksichtigung des durch die COVID-19-Pandemie ausgelösten Digitalisierungsschubs Energieverbrauchszenarien der IKT-Infrastrukturen analysiert und realistische Einsparpotenziale identifiziert.



## Beobachtungstechnologien im Bereich der zivilen Sicherheit – Möglichkeiten und Herausforderungen

Sensorsysteme für die Detektion gefährlicher Substanzen, dronengestützte Fotokameras für die Herstellung von Übersichtsaufnahmen in Katastrophengebieten, Videokameras für die Beobachtung und Aufzeichnung von Straftaten oder die Erhebung von elektronischen Kommunikationsdaten für die Aufdeckung krimineller Strukturen – Beobachtungstechnologien werden im Bereich der zivilen Sicherheit für viele Aufgaben eingesetzt und ständig kommen neue Anwendungsfelder dazu. In Öffentlichkeit, Wissenschaft und Politik wird der Einsatz von Beobachtungstechnologien für zivile Sicherheitsaufgaben allerdings kontrovers diskutiert. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 190](#) bietet eine fundierte Sachgrundlage für die politische Meinungsbildung und zeigt Gestaltungsoptionen für einen zielführenden und gesellschaftlich tragfähigen Umgang mit Beobachtungstechnologien im Bereich der zivilen Sicherheit auf.



## **Algorithmen in digitalen Medien und ihr Einfluss auf die Meinungsbildung**

In den vergangenen Jahren nahm die Nutzung digitaler Medien für Nachrichtenzwecke und damit die Bedeutung für die individuelle und öffentliche Meinungsbildung kontinuierlich zu. Bei diesen Formaten, die über das Internet aufgerufen und über Informationsintermediäre (große Onlineplattformen) verbreitet werden, bestimmen Algorithmen die Auswahl und Strukturierung der Inhalte, die den Nutzer/innen angezeigt werden. Doch welchen Einfluss haben Onlineplattformen auf die Meinungsbildung? Was kennzeichnet den medienrechtlichen Rahmen und welche gesetzgeberischen Weichenstellungen können dazu beitragen, die freie individuelle und öffentliche Meinungsbildung als Fundament demokratischer Gesellschaften zu stärken? Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 204](#) zum Einfluss von Algorithmen in digitalen Medien diskutiert Herausforderungen, wissenschaftliche Erkenntnisse und den rechtlichen Rahmen.



## **Mögliche gesundheitliche Auswirkungen verschiedener Frequenzbereiche elektromagnetischer Felder**

Hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) bilden die Grundlage der digitalen, drahtlosen Kommunikation im gesamten öffentlichen Raum und in den privaten Haushalten. In den kommenden Jahren ist mit einer weiteren Zunahme von EMF-Quellen verschiedener Frequenzbereiche zu rechnen. Hauptgrund hierfür ist die rasant fortschreitende Digitalisierung nahezu aller Arbeits-, Lebens- und Wirtschaftsbereiche, die zugleich eng mit mobil zu nutzenden Technologien verbunden ist. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 196](#) bietet eine umfangreiche Faktengrundlage für die parlamentarische Befassung sowie Gestaltungsoptionen für einen gesellschaftlich tragfähigen Umgang mit diesem gesundheits-, wirtschafts- und technologiepolitischen Thema.



## Data-Mining – gesellschaftspolitische und rechtliche Herausforderungen

Im engeren Sinn bezeichnet Data-Mining die zunehmend automatisierte Analyse von Datenbeständen, um Informationen u.a. über Muster, Trends oder Korrelationen zu gewinnen. Gesellschaftliche Herausforderungen werden vor allem sichtbar, wenn man Data-Mining als Prozess betrachtet, zu dem auch die der Analyse vorgelagerte Aufgabendefinition, die Datenauswahl und -aufbereitung sowie die nachgelagerte Validierung und Nutzung der Ergebnisse gehören. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 203](#) beleuchtet Data-Mining aus technischer und rechtlicher Perspektive und erläutert anhand zahlreicher Anwendungsbeispiele vor allem aus der Medizin und dem Gesundheitswesen die damit verbundenen gesellschaftlichen Herausforderungen.



## Herausforderungen für die Pflanzenzüchtung: Auswirkungen des Strukturwandels in der Pflanzenzüchtung auf die genetische Diversität, die Sortenvielfalt und die Leistungsfähigkeit der heimischen Landwirtschaft

Die Pflanzenzüchtung ist ein zentrales Element einer zukunftsähigen, nachhaltigen Landwirtschaft. Sowohl aus Gründen der Zukunftsvorsorge als auch in forschungs- und innovationspolitischer Hinsicht gilt die Förderung der Pflanzenzüchtung bzw. der Züchtungsforschung als wichtige öffentliche Aufgabe. Allerdings wird die Bedeutung der Pflanzenzüchtung, der Agrobiodiversität und der Landwirtschaft insgesamt nach Einschätzung des TAB in der öffentlichen Debatte nicht angemessen abgebildet. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 197](#) informiert über Zielstellungen und Methoden der Pflanzenzüchtung sowie die nationalen und internationalen rechtlichen Regelungen für Sorten- und Patentschutz, Saatgutzulassung und den Zugang zu den weltweiten genetischen Ressourcen und leitet politische und gesellschaftlichen Handlungsoptionen zur Stärkung einer vielfältigen und vielfaltsfördernden Pflanzenzüchtung ab.



## Welt ohne Bargeld – Veränderungen der klassischen Banken- und Bezahlssysteme

Bargeld ist in Deutschland das einzige unbeschränkt gesetzliche und nach wie vor auch das am häufigsten verwendete Zahlungsmittel. Die [TAB-Kurzstudie Nr. 2](#) bietet einen Überblick über Entwicklungen im Zahlungsverkehr bis einschließlich Februar 2021. Die spezifischen Eigenschaften von Bargeld sowie ausgewählter unbarer Zahlungslösungen werden darin genauso in den Blick genommen und miteinander verglichen wie das Zahlungsverhalten in Deutschland, Schweden und China. Eine Betrachtung des sich wandelnden Machtgefüges im Zahlungsverkehr durch das Auftreten neuer Akteure und die Reaktionen traditioneller Kreditinstitute und Zentralbanken hierauf runden die Kurzstudie ab.



## Umgang mit Nichtwissen bei explorativen Experimenten

Wissenschaftliche Experimente im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Technologien lassen sich oftmals nicht auf Labore mit kontrollierbaren Bedingungen beschränken, sondern finden als Realexperimente in der Umwelt bzw. der Gesellschaft statt. Solche explorativen Experimente werden sowohl im Zuge von Erstentwicklungen als auch im Rahmen von Folgeanwendungen von Technologien durchgeführt. Unsicheres Wissen bzw. Nichtwissen, das Ursache, Triebfeder und inhärenter Bestandteil aller wissenschaftlichen Forschung ist, erhält beim Übergang vom Forschungslabor in die Welt eine größere Tragweite, da negative Auswirkungen dort viel schwieriger zu kontrollieren sind. Das [TAB-Hintergrundpapier Nr. 23](#) behandelt Fragen der guten Governance bei explorativen Experimenten am Beispiel der drei Forschungsfelder Grüne Gentechnik, Fracking und Meeresdüngung mit Eisen.



## Themenfindungsrunden

Im Herbst 2020 und im Frühjahr 2022 initiierten die jeweiligen Vorsitzenden des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung eine Anfrage nach neuen Themen an alle Ausschüsse und Fraktionen des Deutschen Bundestages. Aus den insgesamt 70 Vorschlägen wurden 14 für eine Bearbeitung durch das TAB ausgewählt:

### 2020/2021

- Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken
- Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes
- Bakteriophagen in Medizin, Land- und Lebensmittelwirtschaft – Anwendungsperspektiven, Innovations- und Regulierungsfragen
- Chancen und Risiken von Wasserstoffpartnernschaften und -technologien in Entwicklungsländern
- Naturgemäßer Waldumbau in Zeiten des Klimawandels
- Anwendungspotenziale und Herausforderungen von künstlicher Intelligenz in der Bildung
- E-Voting – alternative Wahlformen und ihre Absicherung

### 2022

- Nachhaltige und sichere Konzepte für eine klimaverträgliche Schifffahrt
- Cybersicherheit in der Nahrungsmittelproduktion
- Auswirkungen von Offshore-Windparks auf die Umwelt
- Rechtliche und gesellschaftliche Herausforderungen sowie Innovationspotenziale von Deepfakes
- Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren Luftverkehr
- Gesellschaftliche Auswirkungen von Homeoffice
- Komplexe Systeme – Nutzen oder Last?



## Horizon-Scanning

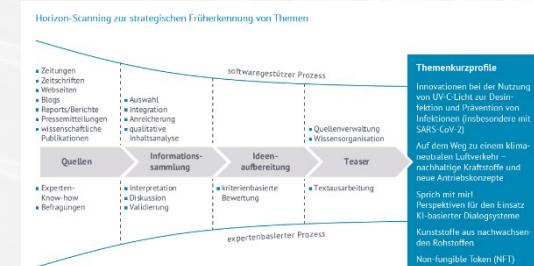
Mittels **Horizon-Scanning** werden neue technologische Entwicklungen beobachtet und diese systematisch auf ihre Chancen und Risiken hin bewertet. So werden technologische, ökonomische, ökologische, soziale und politische Veränderungspotenziale möglichst früh erfasst und beschrieben. Ziel des Horizon-Scannings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

# Horizon SCANNING

## Themenkurzprofile

Die Themenkurzprofile aus dem Horizon-Scanning bieten auf ca. zehn Seiten einen kompakten Überblick über ausgewählte wissenschaftlich-technische Trends und ihre Relevanz für Politik und Gesellschaft. Neben einer zusammenfassenden Einführung und dem Stand der jeweiligen wissenschaftlich-technischen bzw. sozioökonomischen Entwicklung umfassen sie Vorschläge für eine vertiefte Bearbeitung und weiterführende Literatur.

Die neun Themenkurzprofile des Jahres 2021 gehen auf 36 Themenskizzen zurück, aus denen nach umfassender Diskussion im TAB-Team neun Themen aufgrund ihrer Relevanz im gesellschaftlichen Diskurs und im Hinblick auf potenzielle gesetzgeberische Handlungsbedarfe ausgewählt wurden. 2022 wurden aus insgesamt 37 Themenskizzen ebenfalls neun Themen ausgewählt.



## Themenkurzprofile 2021

- Perspektiven eines hybriden Arbeitens im Homeoffice und im Büro
- Learning Analytics – Potenzial von KI-Systemen für Lehrende und Lernende
- Sustainable Cooling - nachhaltige Kühlung bei Hitze
- Beschränkung von Liveveranstaltungen während der Coronapandemie – ökonomische Auswirkungen und digitale Lösungen im Kulturbetrieb
- Die Toilette der Zukunft
- Digitalisierung von Kulturgütern
- Technologien zur Minimierung von Lebensmittelverlusten (Food Waste Technologies)
- Emotionserkennung mittels künstlicher Intelligenz – Perspektiven und Grenzen von Technologien zur Analyse von Gesichtsbewegungen
- Hyperloop

## Themenkurzprofile 2022

- Innovationen bei der Nutzung von UV-C-Licht zur Desinfektion und Prävention von Infektionen (insbesondere mit SARS-CoV-2)
- Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen
- Auf dem Weg zu einem klimaneutralen Luftverkehr – nachhaltige Kraftstoffe und neue Antriebskonzepte
- Sprich mit mir! Perspektiven für den Einsatz KI-basierter Dialogsysteme
- Non-fungible Tokens (NFTs)
- Maritime Landwirtschaft
- Urbane Seilbahnen
- Innovative Schiffbaukonzepte: Beitrag zur Nachhaltigkeit
- Föderales maschinelles Lernen



## Dialogveranstaltungen und repräsentative Befragungen

Die Förderung des öffentlichen Dialogs und der gesellschaftlichen Meinungsbildung ist ein wichtiger Teil der parlamentarischen TA. Einem systematischen Erfahrungs- und Meinungsaustausch mit gesellschaftlichen Akteuren im Deutschen Bundestag kommt besondere Bedeutung bei der Themenfindung und -strukturierung sowie bei der öffentlichen Diskussion der Ergebnisse zu. Mithilfe von partizipativen Diskursanalysen werden Einstellungen und Debatten hinsichtlich zukünftiger Nachfrage- und Handlungserfordernisse repräsentativ untersucht, um gesellschaftliche Bedarfe und Positionen in TA-Untersuchungen systematisch berücksichtigen zu können.

### TA im Dialog: Impfungen und Gene Drives gegen Malaria

Anlässlich des Weltmalariaatags am 25.4.2022 wurden im Rahmen einer moderierten Podiumsdiskussion sowohl der Stand der Impfstoffentwicklung als auch der gänzlich neue Gene-Drive-Ansatz zur Bekämpfung der Malaria übertragenden Anopheles-Stechmücke vorgestellt. Eingeladene Expert/innen und Parlamentarier/innen tauschten sich mit dem Publikum zu den Potenzialen und Herausforderungen dieser beiden technologischen Ansätze zur Malariabekämpfung aus. Thematisch knüpfte die Veranstaltung an zwei Untersuchungen des TAB an: zum einen an das Projekt »Medikamente für Afrika« zum anderen an das Projekt »Gene Drives – Technologien zur Verbreitung genetischer Veränderungen in Populationen«, in dem Potenziale und Herausforderungen dieser komplexen biotechnologischen Innovation analysiert werden.



Yvonne Magwas, Vizepräsidentin des Deutschen Bundestages, eröffnete die Veranstaltung.

TAB- News vom 2.5.2022:  
[»TA im Dialog« am Weltmalariaatag](#)

Veranstaltungsbericht auf bundestag.de: [Neue Ansätze zur Bekämpfung von Malaria](#)

## Öffentliche Fachgespräche

### Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken – Lehren aus der Coronakrise (22.6.2022)

Ob Coronapandemie, Klimawandel, soziale und internationale Konflikte, Finanz- und Wirtschaftskrisen, (Cyber-)Terrorismus oder drohende Ressourcenknappheit: Gesellschaften, aber auch Parlamente und Regierungen sind einer beispiellosen Vielfalt von Herausforderungen ausgesetzt.

Im TAB-Projekt »Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken« wird untersucht, wie ein kontinuierliches vorausschauendes Krisenradar gestaltet und institutionell verankert sein müsste, um ein früh- bzw. rechtzeitiges Krisen- und Risikomanagement zu ermöglichen.

Im öffentlichen Fachgespräch wurden die Zwischenergebnisse des Projekts im Zusammenhang mit der Aufarbeitung der Erfahrungen mit Frühwarnsystemen in der Coronapandemie vorgestellt und gemeinsam mit Expert/innen aus der Wissenschaft und Mitgliedern des Deutschen Bundestages diskutiert.



[Dokumentation der Veranstaltung auf bundestag.de](#)

Aufzeichnung im [YouTubekanal des Deutschen Bundestages](#)

## E-Voting – alternative Wahlformen und ihre Absicherung (6.4.2022)

Mit der elektronischen Stimmabgabe, z. B. online über den heimischen PC oder per Smartphone, wird angestrebt, eine ergänzende Möglichkeit zur herkömmlichen Wahl per Stimmzettel oder Brief zu schaffen. Onlineabstimmungen können, vergleichbar mit einer Briefwahl, vor allem solchen Wählergruppen die Wahlteilnahme erleichtern, die bei herkömmlichen Abstimmungsprozeduren auf Zugangshürden stoßen. Im Zuge der COVID-19-Pandemie und den damit verbundenen Anforderungen der sozialen Distanzierung haben Onlinewahlen zusätzlich an Bedeutung gewonnen.

Neben den Vorzügen einer Onlineabstimmung wird jedoch auch eine erhöhte Gefahr für Manipulationen von Wahlen vermutet, woraus Vertrauens- und Akzeptanzprobleme resultieren könnten. Manche befürchten überdies, dass die Onlineabstimmung zur Banalisierung des Wahlakts führt und wichtige Grundsätze politischer Wahlen, wie die Öffentlichkeit der Wahl, verletzt.

Im öffentlichen Fachgespräch wurden die Zwischenergebnisse der TAB-Kurzstudie zum E-Voting in Form eines Thesenpapiers vorgestellt und mit Sachverständigen diskutiert.



[Dokumentation der Veranstaltung auf bundestag.de;](#)  
[Aufzeichnung im YouTubekanal des Deutschen Bundestages](#)

## Präsentationen in Ausschusssitzungen

### Vorstellung des TAB zu Beginn der Legislaturperiode

durch Prof. Dr. Armin Grunwald (26.1.2022)

### **Präsentation der Projektergebnisse »Genome Editing am Menschen«**

durch Projektleiter Dr. Steffen Albrecht (6.7.2022)



## Erhebungen von Stakeholderperspektiven

Die Reihe TAB-Sensor thematisiert gesellschaftliche Wahrnehmungen, Bewertungen und Sichtweisen zu Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Grundlage sind empirische Erhebungen bei gesellschaftlichen Stakeholdern sowie repräsentative Befragungen.

### TAB-Sensor Nr. 5

#### Wie schätzen Bürger/innen die Coronapandemie und ihre Folgen ein?

#### Ergebnisse einer Repräsentativbefragung (2022)

Die Coronapandemie fordert die Gesellschaft heraus. Die bundesweite Befragung zur Coronapandemie und zu ihren Folgen rückt sowohl die persönlichen Belastungen und Bewältigungsstrategien als auch das Vertrauen in den gesellschaftlichen Umgang mit der Coronapandemie einschließlich der staatlichen Bewertungs- und Entscheidungswänge in den Mittelpunkt. Die Ergebnisse der repräsentativen Onlinebefragung zeigen, dass die deutliche Mehrheit der Befragten die Coronapandemie nach eigener Einschätzung (eher) gut bewältigt hat. Dass viele Menschen nach eigener Auffassung (eher) gut durch die Coronapandemie gekommen sind, ist zunächst darauf zurückzuführen, dass sie ihren individuellen Fähigkeiten und Kompetenzen vertrauen und diese offensichtlich auch belasten können.



### TAB-Sensor Nr. 4

#### Wie bewerten Bürger/innen die Telemedizin? Ergebnisse einer Repräsentativbefragung (2022)

Die Telemedizin im Sinne einer medizinischen Versorgung von Patient/innen aus der Distanz unter Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) prägt zunehmend das Gesundheitswesen. Spätestens seit der Coronapandemie werden telemedizinische Angebote verstärkt ausgebaut und nachgefragt, um Kontakte zu reduzieren und Wege in die Arztpraxen oder Krankenhäuser zu vermeiden sowie gleichzeitig die medizinische Versorgung über die Distanz hinweg zu erhalten. Die Nutzenbetrachtung von Telemedizin kann aus verschiedenen Perspektiven erfolgen: Neben Aspekten der medizinischen Versorgungsqualität und -effizienz ist die Sichtweise der Patient/innen bzw. Bürger/innen wesentlich, um Fragen der zukünftigen Akzeptanz und Relevanz telemedizinischer Angebote sinnvoll adressieren zu können. Der TAB-Sensor rückt entsprechend Fragen zur Nutzung und zu den Nutzenpotenzialen von telemedizinischen Angeboten in den Mittelpunkt.



## Internationale Zusammenarbeit

### Präsidentschaft des EPTA-Netzwerks im Jahr 2022

Im EPTA-Netzwerk arbeiten die TA-Einrichtungen europäischer Parlamente seit 1990 zusammen, um die Beratung der Abgeordneten zu wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen inhaltlich und methodisch weiter zu verbessern. Im Jahr 2022 übernahm das TAB die Präsidentschaft und damit die Koordination der Aktivitäten des Netzwerks.

Die deutsche Präsidentschaft war durch ein weiteres Wachstum des Netzwerks sowie durch die große Aufmerksamkeit geprägt, die die EPTA-Konferenz im Oktober 2022 auf sich zog.

Lag der thematische Fokus im Vorjahr noch auf der Covid-19-Pandemie, so weitete sich der Blick nun auf Disruptionen ganz unterschiedlicher Art. Bei der Übergabe der Präsidentschaft durch das Rathenau Instituut, die am 23. März 2022 im Rahmen einer Feier in der Niederländischen Botschaft in Berlin erfolgte, waren zwar noch überall Coronamasken zu sehen. Doch der kurz zuvor erfolgte kriegerische Angriff Russlands auf die Ukraine hatte schmerhaft deutlich gemacht, dass die heutige Zeit durch eine Vielzahl weiterer Krisen gekennzeichnet ist, wie der Vorsitzende des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages, Kai Gehring, bei der Übernahme der Präsidentschaft betonte. Disruptionen in ihren unterschiedlichen Ausprägungen standen dann auch im Vordergrund des zweiten Highlights der Präsidentschaft, der EPTA-Konferenz im Deutschen Bundestag. Mehr als 150 Abgeordnete und Wissenschaftler/innen aus Deutschland und 16 weiteren Ländern tauschten sich zu den Herausforderungen und den möglichen politischen Reakti-



Kai Gehring betonte in seiner Rede die große Bedeutung der europäischen Kooperation in der Technikfolgenabschätzung.



Alba Verges i Bosch, Vizepräsidentin des Parlaments von Katalonien und Kai Gehring, Vorsitzender des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, bei der symbolischen Übergabe der EPTA-Präsidentschaft für 2023 an Katalonien.

onen in Zeiten multipler Krisen aus. Mit dieser Resonanz, aber auch mit einer beachtlichen (auch sozial-)medialen Berichterstattung stellte die Konferenz bereits einen ersten Schritt zur Einlösung der auf dem Abschlusspodium von Parlamentariern geäußerten Erwartung an die TA-Community dar: »Make noise, raise public awareness«.

Bei der Mitgliederversammlung des Netzwerks konnten 2022 zwei neue Mitglieder begrüßt werden: Die Cellule Scientifique der Chambre des Députés von Luxemburg und die Oficina Científica de Asesoramiento Legislativo (OCAL) des argentinischen Parlaments. Die russische TA-Einrichtung wurde dagegen von der Mitgliedschaft ausgeschlossen. Für 2023 wurde der Staffelstab der EPTA-Präsidentschaft an CAPCIT, die TA-Einrichtung des Parlaments von Katalonien, übergeben.

## Aktivitäten im EPTA-Netzwerk 2021-2022

- EPTA Directors Meeting (virtuell, 26./29.4.2021)
- [EPTA-Konferenz 2021](#) (Den Haag/virtuell, 8./9.11.2021)
- [EPTA-Report 2021: Lehren aus der COVID-19-Pandemie](#) (PDF)
- EPTA-Council 2021 (Den Haag/virtuell, 08./09.11.2021)
- [Übergabe der EPTA-Präsidentschaft](#) (Berlin, 23.3.2022)
- EPTA Directors Meeting (Karlsruhe, 9.-11.5.2022)
- EPTA Practitioners Meeting (Oslo, 28.-30.9.2022)
- [EPTA-Konferenz 2022](#) (Berlin, 17.10.2022)
- [EPTA-Report 2022: Disruption in society – TA to the rescue?](#) (PDF)
- [EPTA Council](#) (Berlin, 17./18.10.2022)



Marc Elsberg bei seiner Keynote zur EPTA-Konferenz



Gruppenbild EPTA-Delegierte mit Abgeordneten auf der Bramante-Treppe im Marie-Elisabeth-Lüders-Haus



Petra Pau, Vizepräsidentin des Deutschen Bundestages, bei ihrer Rede in der Deutschen Parlamentarischen Gesellschaft

## Weiterentwicklung der (digitalen) Wissenschaftskommunikation

### Neuer Internetauftritt (Dezember 2021)

Mit dem Relaunch der Webseite unter systematischer Einbindung aller TAB-Projekte und TAB-Publikationen aus den Jahren 1991-2021 in das Open-Access-Repository KITopen konnten wir nicht nur die Voraussetzung für einen zeitgemäßen und barriearmen Zugang zu Angeboten und Leistungen der parlamentarischen TA für Abgeordnete, Medien, die Wissenschaftscommunity und die breite Öffentlichkeit schaffen, sondern auch eine Basis für die Weiterentwicklung unserer digitalen Angebote entwickeln.

### TABlog

Seit Januar 2022 haben wir einen Blog – den [TABlog](#) – eingerichtet, um über unsere Publikationen hinaus Updates aus unseren Projekten und Beobachtungen zu Themen im Kontext des wissenschaftlich-technischen Wandels zu veröffentlichen.

### Leichte Sprache

Damit mehr Menschen unsere Webseite benutzen können, bieten wir seit März 2022 Informationen zum TAB und zu ausgewählten Projekten in Leichter Sprache an.



Am 15.12.2021 wurde die neue TAB-Webseite online gestellt.



Leichte Sprache

# TAB BRIEF

## Willkommen zum neuen TAB-Brief

Ausgabe 01/2022



Liebe Leserinnen und Leser,

Mit Beginn der 20. Wahlperiode des Deutschen Bundestages haben wir nicht nur unseren Internetauftritt neugestaltet, sondern bieten zukünftig den TAB-Brief in einer neuen, moderneren Form an: als kompakten digitalen Newsletter.

Drei- bis viermal im Jahr, und damit deutlich häufiger als bislang, werden wir über neue Veröffentlichungen und zurückliegende Veranstaltungen informieren, ausgewählte laufende Projekte vorstellen und den Blick verstärkt auch nach außen richten – auf wichtige Entwicklungen im TA-Kontext national und international. In dieser ersten Ausgabe schauen wir unter anderem auf das Thema Bauen und auf Fortschritte bei der Malaria-Impfstoffentwicklung.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre.

Ihr Newsletter-Team

P.S. Wir freuen uns, wenn Sie uns treu bleiben! Sollten Sie den TAB-Brief zukünftig nicht mehr erhalten wollen, finden Sie am Ende des Newsletters einen Link zur Abmeldung.

[Newsletter abonnieren](#)

## TAB-Briefe als E-Mail-Newsletter (seit April 2022)

Nach 30 Jahren TAB-Briefen (und 51 Ausgaben in klassischer Form) bieten wir seit April 2022 regelmäßige Informationen zur Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag mit dem [TAB-Brief als E-Mail-Newsletter](#). Zu den ca. 300 Empfängern des klassischen TAB-Briefs konnten wir bis zum Jahresende 2022 über 550 neue Abonnent/innen hinzugewinnen.

## Webseitenbesuche

Im Berichtszeitraum konnten wir einen deutlichen Zuwachs an Besuchen auf unserer Webseite feststellen, obwohl unsere Publikationen ab Mitte 2021 auf KITopen ausgelagert wurden (siehe »Neuer Internetauftritt«, S. 22). Besuchten im Jahr 2021 gut 40.000 unterschiedliche Besucher/innen unsere Webseite, waren es gemäß der Webanalyse 2022 mit über 50.000 ca. 25 % mehr.

Unterschiedliche Besucher	Anzahl der Besuche	Zugriffe
2021	41.904	207.569
2022	50.210	238.826

## Ausbau der Social-Media-Aktivitäten

Auch unsere Social-Media-Aktivitäten haben wir ausgeweitet und diversifiziert. Neben einem seit 2017 genutzten [Twitterprofil](#) konnten wir im Berichtszeitraum unsere Präsenz in weiteren sozialen Netzwerken ausbauen und bei [LinkedIn](#) (seit 04/2021), bei [Instagram](#) (seit 12/2021) und bei [Mastodon](#) (seit 12/2022) neue Zielgruppen gewinnen.

## TAB in den Medien

Ob Studienergebnisse oder Fachgespräche – die Aktivitäten des TAB erfreuten sich im Berichtszeitraum einer wachsenden Aufmerksamkeit in zahlreichen überregionalen Tageszeitungen sowie in weiteren einschlägigen Medien und Onlinequellen.

Hier eine Auswahl:

### 2021

- [web.de / gmx.net-Newsportal](#) (04.01.2021), „Angst vor dem Flash War – schaffen autonome Waffen Kriegsgefahr?“
- [Spektrum der Wissenschaft](#) (17.02.2021), Schlagabtausch in Maschinengeschwindigkeit.
- [riffreporter.de](#) (17.02.2021), Pflegeroboter – Wenn Maschinen Senioren umsorgen. Roboter sind stark, werden nie müde oder ungeduldig. Macht sie das zu guten Pflegern?
- [Spiegel online](#) (02.03.2021), Wettkampf der Kampfroboter.

### 2022

- [hr info](#) (28.04.2021), Deepfakes - Bleibt die Wirklichkeit auf der Strecke? (Podcast mit Marc Bovenschulte)
- [nzz.ch](#) (26.12.2021), „Eine Technik, die einmal in der Welt ist, kann man kaum absichtlich wieder verschwinden lassen“ (Interview mit Armin Grunwald).
- [Deutschlandfunk / Forschung aktuell](#) (16.04.2022), Online-Wahlen. Der Bundestag lotet die Optionen für die elektronische Stimmabgabe aus.
- [Das Parlament](#), (02.05.2022) »Aus einer Mücke einen Elefanten machen«, Artikel zur [Podiumsdiskussion am Weltmalariantag](#).
- [taz.de](#) (23.06.2022), Lehre aus der Corona-Pandemie: Gewappnet für Krisen? Artikel zum öffentlichen Fachgespräch [Resilienz stärken- Lehren aus der Coronakrise](#).
- [mitmischen.de](#) (28.06.2022), Frühwarnsysteme. Lehren aus der Corona-Krise.
- [faz.de \(+\)](#) (15.08.2022), Rettet das Bargeld! Ein Kommentar.
- [heise.de](#) (11.10.2022), IKT-Energiebedarf: Worst-Case-Szenario wird wahrscheinlicher. Technikfolgen-Abschätzer warnen. Verbrauchern legen sie Datensparsamkeit ans Herz
- [ftd.de](#) (11.10.2022), Worst-Case beim IT-Energieverbrauch möglich. TAB-Studie: Verbrauch der Rechenzentren und Netze könnte sich bis 2030 mehr als verdoppeln.
- [zeit.de \(+\)](#) (12.10.2022), Pläne für Tag X. Wenn der Strom plötzlich ausfällt, hat das fatale Folgen.
- [nzz.ch](#) (21.10.2022), Blackout in Deutschland: Was passiert, wenn Millionen Menschen tagelang keinen Strom haben? Ein Szenario.
- [zdf.de - heute-show](#) (21.10.2022), Die heute-show thematisiert die Folgen eines bundesweiten Stromausfalls auf Basis der TAB-Blackout-Studie (ab 23. Minute).
- [Das Parlament](#) (24.10.2022), Ortstermin: EPTA-Konferenz. Die Kalkulation der Krise.
- [netzpolitik.org](#) (04.11.2022) Bundestagsstudie: Polizeiliche Überwachung und ihre negativen Folgen.
- [heise.de](#) (23.12.2022), Roboterjournalismus: Foscher fordern Label für automatisch erstellte Texte.

[Zum Medienspiegel](#)

## Welche TAB-Publikationen wurden am häufigsten abgerufen?

### 2021

- 21.000 Downloads  
TAB-Arbeitsbericht Nr. 141 und Buchausgabe:  
Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden und großräumigen Stromausfalls/Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften - am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung
- 9.600 Downloads  
TAB-Arbeitsbericht Nr. 180: Virtual und Augmented Reality : Status quo, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen.
- 9.500 Downloads  
TAB-Arbeitsbericht Nr. 171: Digitale Medien in der Bildung
- 9.300 Downloads  
TAB-Arbeitsbericht Nr. 153: Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt
- 6.900 Downloads  
TAB-Arbeitsbericht Nr. 184: Aktueller Stand und Entwicklungen der Pränataldiagnostik. Endbericht zum Monitoring

### 2022

- 19.200 Downloads  
TAB-Arbeitsbericht Nr. 141 und Buchausgabe:  
Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden und großräumigen Stromausfalls/Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften - am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung
- 4.000 Downloads  
EPTA Report 2021: Technology assessment and decision making under scientific uncertainty - lessons from the COVID-19 pandemic
- 3.700 Downloads  
Technology Assessment Studies Series no. 4: What happens during a blackout: Consequences of a prolonged and wide-ranging power outage
- 3.000 Downloads  
TAB-Hintergrundpapier Nr. 16: Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke. Monitoring
- 2.500 Downloads  
Themenkurzprofil Nr. 22: Die zunehmende Eigendynamik von Kryptowährungen und ihre Folgen

## Abrufstatistik TAB-Publikationen

sortiert nach Downloads und Seitenaufrufen im Repository KITopen

seit Einstellung in KITopen*	im Jahr	im Jahr
Alle TAB-Publikationen	2022	2023
TAB-Berichte	2022	2023
TAB-Fokus	2022	2023
Themenkurzprofile	2022	2023
TAB-Sensor	2022	2023
TAB-Briefe**	2022	2023
Bücher***	2022	2023
TAB Publications (in English)	2022	2023

Eine ausführliche Abrufstatistik zu allen TAB-Publikationen sowie eine Top Ten des Monats vom zentralen Open-Access-Repository KITopen steht online zur Verfügung.

Zugriffe auf TAB-Publikationen in anderen Bibliotheksrepositorien sowie die als Bundestagsdrucksachen zur Verfügung gestellten [TA-Untersuchungen im DIP](#) (gemäß § 56a der GO) oder von der Webseite des Bundestages gehen nicht in die Zählung ein.

[Zur Publikationsstatistik](#)

## Die Berichterstattergruppe TA

Die Berichterstattergruppe TA wird zu Beginn jeder Legislaturperiode aus je einem Mitglied der Fraktionen (oder Gruppen) im Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung neu gebildet. Von der 19. zur aktuellen 20. Wahlperiode fand eine fast komplett Neubesetzung der Berichterstattergruppe TA statt, auch der Ausschussvorsitz wechselte von Dr. Ernst-Dieter Rossmann auf Kai Gehring.

Die Gruppe tagt – gemeinsam mit dem Ausschussvorsitzenden und Vertreter/innen des TAB – in der Regel monatlich und bereitet alle das TAB und seine Organisation betreffenden Entscheidungen des Ausschusses vor: vom Beschluss über die Durchführung eines TA-Vorhabens und zugehörige Gutachtenvergaben bis zur Abnahme des Abschlussberichts. Dabei orientiert sie sich am Konsensprinzip.

Die politische Steuerung des TAB liegt entsprechend dem § 56a der Geschäftsordnung des Deutschen Bundestages in den Händen des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung. Dazu bildet er eine Berichterstattergruppe TA, Das Sekretariat des Ausschusses unterstützt die Kommunikation zwischen TAB und den Gremien und Mitgliedern des Deutschen Bundestages.

### Mitglieder der Berichterstattergruppe TA in der 19. Wahlperiode (2017-2021)



### Mitglieder in der aktuellen Wahlperiode (2021-2025)



## Das TAB

Das TAB wird seit 1990 vom **Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)** des **Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)** – auf Basis eines Vertrags mit dem Deutschen Bundestag – betrieben. Seit September 2013 kooperiert das KIT beim Betrieb des TAB mit dem **IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH** und der **VDI/VDE Innovation + Technik GmbH**. Standort des TAB und seines interdisziplinären **Teams** ist Berlin.

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)  
Neue Schönhauser Straße 10 | 10178 Berlin  
[www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de)



## Bildnachweise

Titel und Umschlag: TAB/Bernd Stegmann  
S. 5: andriano/123rf; zlikovec/123rf  
S. 6: Andrii Yalanskyi/123rf; mnsanthoshkumar  
S. 7: FredFroese/iStock; Pop Nukoonrat/pixabay.com

S. 8: MIKHAIL GRACHIKOV@123rf; Diana Johanna Velasquez/123rf  
S. 9: Kiatdumrong/123rf.com; Yanawut Suntornkij/123rf  
S. 10: scusi/123rf; succo/Pixabay  
S. 11: nicoelnino/123RF; serezniy/whiteboxmedia@123rf  
S. 12: Aleksandr Belugin/123rf; alonesdj/123rf  
S. 13 u. S. 16: TAB/Bernd Stegmann  
S. 17: natanaelginting/freepik; TAB/Bernd Stegmann  
S. 20: TAB/Bernd Stegmann; TAB/Konstantin Börner  
S. 21: TAB/Konstantin Börner (3)



# Das TAB im Jahr 2023

Deutscher Bundestag

Ausschuss für Bildung, Forschung  
und Technikfolgenabschätzung

Ausschussdrucksache  
20(18)218

---

## Inhalt

Das Jahr in Zahlen	3
Editorial	4
TA-Untersuchungen	5
Abgeschlossene TA-Projekte	5
TA-Kompakt-Studien	10
Foresight-Aktivitäten	11
Horizon-Scanning	11
Themenkurzprofile	11
TAB-Ergebnisse im Bundestag	13
Im Plenum des Bundestages	13
In Ausschusssitzungen	15
Im Werkstattgespräch	15
Internationale Zusammenarbeit	16
Ausbau der Wissenschaftskommunikation	17
Die Berichterstattergruppe TA	21
Das TAB	22

---

## Das Jahr in Zahlen

8 abgeschlossene TA-Projekte

5 Berichte mit insgesamt 1.000 Seiten veröffentlicht

12 Kurzfassungen zu den Berichten (TAB-Fokus; in deutscher und englischer Sprache) veröffentlicht

10 Themenkurzprofile à ca. 10 Seiten veröffentlicht

10 Besprechungen im Kreis der Berichterstattergruppe Technikfolgenabschätzung

5 Beiträge im TABlog

6 x Ergebnisse in Ausschüssen vorgestellt

2 Plenardebatten zu TAB-Berichten

12 x in Bundestagsdrucksachen erwähnt

über 50.000 unterschiedliche Website-Besucher/innen

## Editorial

Wie alle fünf Jahre war 2023 ein besonders spannendes für das Betreiberkonsortium des TAB: Der Betrieb im Auftrag des Bundestages wurde zum 1. September turnusgemäß neu ausgeschrieben, und zu unserer großen Freude fiel die Wahl des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (AfBFT) erneut auf das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit den Kooperationspartnern IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (VDI/VDE-IT).

Mit unserem Angebot für die kommende Vertragsperiode ist eine Neujustierung unserer Aktivitäten verbunden, die drei Schwerpunkte umfasst: eine deutliche Erweiterung der Foresight-Aktivitäten mit Fokus auf Innovation und transformative Resilienz, der Einsatz eines erweiterten Methodenspektrums im digitalen und partizipativen Bereich und nicht zuletzt der weitere Ausbau der Wissenschaftskommunikation, um die TA-Sichtbarkeit innerhalb und außerhalb des Bundestages zu erhöhen.

Die gesellschaftlich, politisch und auch wirtschaftlich bedeutendste Technologie des Jahres 2023 war zweifellos die generative künstliche Intelligenz (KI), nachdem Ende 2022 ChatGPT der Allgemeinheit zugänglich gemacht wurde. Vermutlich noch nie in der Geschichte der Menschheit hat eine Anwendung in so kurzer Zeit so viele Menschen in ihren Bann gezogen und private und öffentliche Debatten in einem vergleichbaren Ausmaß ausgelöst.

Der AfBFT reagierte sehr schnell: Anfang Februar 2023 beauftragte er das TAB, innerhalb von zwei Monaten einen vertieften Überblick über ChatGPT und vergleichbare Computermodelle zur Sprachverarbeitung und ihre Auswirkungen in technischer, sozialer und ethischer Hinsicht zu erarbeiten. Der Bericht wurde im April 2023 in einer öffentlichen Sitzung des AfBFT gemeinsam mit weiteren Fachleuten beraten, die politische und mediale Aufmerksamkeit war groß. Die erfolgreiche Erarbeitung dieser Analyse in nur wenigen Monaten war ein weiterer Anstoß, um in Zukunft neben den umfassenden TA-Studien bei

besonders aktuellen Themen kurze Projektformate unter der Bezeichnung TA-Kompakt zu wählen.

2023 war insgesamt ein Jahr mit viel Kommunikation über TA-Themen, in der Gesellschaft allgemein wie auch im Deutschen Bundestag. Mehrere Plenardebatten sowie Sitzungen unterschiedlicher Ausschüsse zu Ergebnissen von TAB-Berichten sind in diesem Bericht dokumentiert. In der Kommunikation nach außen trug die Kooperation mit dem Science Media Center erste Früchte, und die Konferenz des EPTA-Netzwerks in Barcelona bot Gelegenheit, sich international über politische und wissenschaftliche Perspektiven – auch hier zum Thema generative KI – auszutauschen.

Den Aufgaben und Herausforderungen im Jahr 2024 schauen wir mit Spannung und Zuversicht entgegen und freuen uns über das Interesse an unserer Arbeit.

*Armin Grunwald und Arnold Sauter*

---

## TA-Untersuchungen

Die Kernaufgabe des TAB bilden die Untersuchungen im Bereich der Technikfolgenabschätzung (TA), die sich der Analyse komplexer Themen der Wissenschafts- und Technikentwicklung widmen. Das Portfolio der abgeschlossenen TA-Projekte im Jahr 2023 sowie der zwei aufgrund kurzfristigen Informationsbedarfs des Parlaments beauftragten TA-Kompakt-Studien ist das Ergebnis einer Verständigung aller Fraktionen des Bundestages.

---

### Abgeschlossene TA-Projekte

#### Sustainable Cooling

Die Temperaturen in Deutschland steigen seit etwa 1970 kontinuierlich an. Seit Beginn der Klimaaufzeichnungen im Jahr 1881 hat sich die mittlere Lufttemperatur hierzulande bis 2021 um 1,6 °C erhöht. Der zunehmende Bedarf an Kühlung und Klimatisierung muss nachhaltig gedeckt werden, um eine Spirale negativer Wechselwirkungen zu durchbrechen. Steigende Temperaturen erhöhen die Nachfrage nach Kälte- und Klimaanlagen. Sind diese Geräte ineffizient, verwenden klimaschädliche Kältemittel oder werden mit Energie aus fossilen Quellen betrieben, so tragen sie zur Verschärfung des Klimawandels bei. Welche Innovationsbereiche bieten Potenziale, um Kühlung nachhaltig zu gestalten? Mit welchen politischen Handlungsoptionen lässt sich die Umsetzung von Kühlstrategien voranbringen? Die [TAB-Kurzstudie Nr. 4](#) gibt einen Überblick über Ansätze zur Vermeidung des Kühlbedarfs, die insbesondere im Bereich der Stadtplanung und Architektur verortet sind. Darüber hinaus werden technologische und nichttechnische Innovationen dargestellt, die auf die Entwicklung effizienter und emissionsarmer Kühlungstechnologien und -konzepte sowie die Ermöglichung des Zugangs zu diesen Technologien für breite Bevölkerungsschichten fokussieren. Abschließend werden die zentralen politischen Handlungsfelder erörtert, in denen die Umsetzung nachhaltiger Kühlösungen vorangetrieben werden kann bzw. muss.



## Bakteriophagen in Medizin, Land- und Lebensmittelwirtschaft – Anwendungsperspektiven, Innovations- und Regulierungsfragen

Antibiotikaresistenzen sind weltweit ein Problem für die Gesundheit von Mensch, Tier und Umwelt (One Health) und stellen auch das deutsche Gesundheitssystem vor große Herausforderungen. Allein in Deutschland starben 2019 mehr als 45.000 Menschen im Zusammenhang mit antibiotikaresistenten Infektionen. Auch wenn die Möglichkeit zur Bekämpfung bakterieller Infektionen durch Bakteriophagen bereits seit über 100 Jahren bekannt ist und in einigen Ländern der ehemaligen Sowjetunion seitdem kontinuierlich genutzt wurde, wird der Einsatz von Bakteriophagen erst seit einigen Jahren auch weltweit wieder verstärkt thematisiert. Allerdings sind in den westlichen Industrieländern bislang keine Phagenpräparate als Medikamente zugelassen. Für Anwendungen in der Land- und Lebensmittelwirtschaft existieren wenige kommerzielle Produkte, überwiegend außerhalb der EU. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 206](#) bietet einen umfassenden Überblick über Anwendungsperspektiven und Innovationspotenziale von Bakteriophagen in der Medizin und in der Land- und Lebensmittelwirtschaft und zeigt Handlungsoptionen für deren breitere Nutzung auf.



## E-Voting – alternative Wahlformen und ihre Absicherung

Internetwahlen sind Wahlen mit digitalen Endgeräten aus der Distanz, etwa von zu Hause aus, also in Umgebungen, in denen keine direkte Wahlbeaufsichtigung durch Wahlvorstände erfolgen kann. Derzeit wird E-Voting nur in 14 Ländern bei Wahlen eingesetzt. Nur die Hälfte davon sind Demokratien. Die [TAB-Kurzstudie Nr. 5](#) zu Internetwahlen bietet einen Überblick über Vor- und Nachteile von E-Voting im Vergleich zu konventionellen Wahlverfahren durch persönliche Stimmabgabe in einem Wahlbüro bzw. Briefwahl. Die rechtlichen, infrastrukturellen und gesellschaftlichen Voraussetzungen für E-Voting am Beispiel von Estland, der Schweiz und Norwegen werden in ihr genauso in den Blick genommen wie die genauen Abläufe des E-Votingwahlvorgangs in der Praxis in diesen Ländern. Darüber hinaus liegt das Augenmerk auf den gesellschaftlichen und politischen Implikationen, die mit der Einführung von E-Voting einhergehen. Ein szenarienbasierter Ausblick auf mögliche weitere Entwicklungen im Hinblick auf Internetwahlen in Deutschland rundet die Kurzstudie ab.



## Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft

Dienstleistungen der Daseinsvorsorge wie die Grundversorgung mit Wasser oder die Abwasser- und Abfallentsorgung sind unverzichtbar für die Gesellschaft und werden oft von Kommunen erbracht. Die Folgen der COVID-19-Pandemie oder des Ukraine-Kriegs, aber auch langfristige klimatische oder demografische Veränderungen stellen die Kommunen und die mit der Erfüllung der Aufgaben beauftragten Unternehmen vor wachsende Herausforderungen. Der [TAB-Arbeitsbericht Nr. 205](#) untersucht die Potenziale und Grenzen der Digitalisierung für die einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette bei der Sektoren. Darüber hinaus werden Herausforderungen hinsichtlich der Cybersicherheit betrachtet. Aus der Analyse werden Handlungsoptionen für die Politik abgeleitet, um den digitalen Wandel bei gleichzeitiger Gewährleistung der Ver- und Entsorgungssicherheit nachhaltig zu gestalten.



## Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes

Nur ein kleiner Teil der in Deutschland benötigten Rohstoffe wird durch recycelte Materialien gedeckt. Dabei kann die Verwendung solcher Rezyklate dazu beitragen, die Abhängigkeit von Rohstoffen zu reduzieren, die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft zu stärken und Umwelt und Klima zu schonen. Um die Anforderungen an einen verbesserten Rezyklateinsatz differenziert zu beleuchten, wurden im [TAB-Arbeitsbericht Nr. 207](#) drei verschiedene Produkt- bzw. Abfallbereiche untersucht: Kunststoffverpackungen, Elektro- und Elektronikabfälle sowie Bauabfälle. Nach einer Bestandsaufnahme rechtlicher und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, die für die Gewinnung und die Vermarktung von Rezyklaten maßgeblich sind, werden politische Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes übergreifend systematisiert und diskutiert. Als besonders zielführend erweist sich dabei ein gut aufeinander abgestimmter Politikmix aus regulativen, ökonomischen und kooperativen Instrumenten, der gezielt an den bestehenden Hemmnissen für die Nutzung von Rezyklaten ansetzt.



## Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren Luftverkehr

Neue Kraftstoffe und Antriebskonzepte sind essenziell, um den Luftverkehr in Zukunft möglichst klimaneutral zu gestalten. Technischen Innovationen wie E-Fuels auf Basis von grünem Wasserstoff, neuen Antriebskonzepten, aber auch neuen Designs zur Berücksichtigung dieser Innovationen kommt eine wichtige Rolle zu. Die Kurzstudie stellt auf Basis einer Publikations- und Förderdatenanalyse die Schwerpunkte diesbezüglicher FuE-Aktivitäten in Deutschland und Europa dar. Treiber und Barrieren von Innovationen für einen klimaverträglicheren Luftverkehr werden identifiziert und technologische wie politische Optionen zum Erreichen der Klimaschutzziele im Luftverkehr skizziert. Die TAB-Kurzstudie Nr. 6 erscheint im Frühjahr 2024.



## Komplexe Systeme – Nutzen oder Last?

Komplexe Systeme, die eine Vielzahl von Interaktionen und Abhängigkeiten aufweisen, bergen sowohl Chancen als auch Herausforderungen. Das Verhalten einzelner Komponenten wird durch das Verhalten anderer Einzelkomponenten innerhalb des Systems bestimmt, aber auch durch seine Makroeigenschaften sowie externe Einflüsse. Dadurch ist es kaum möglich, das Verhalten eines komplexen Systems zu prognostizieren. Es kann sich durch Selbstorganisation und Selbstregulierung an veränderte Bedingungen anpassen. Zugleich können unter Umständen kleine Störungen zu Kaskadeneffekten bis hin zu Systemversagen führen. Um Nutzen und Kosten der Komplexität kritischer Systeme abzuwegen, schlägt das TAB vor, den Energiesektor aus der Perspektive seiner Komplexität zu untersuchen. Fünf potenzielle Themenbereiche bieten sich dafür besonders an. Der TAB-Arbeitsbericht Nr. 208 erscheint im Frühjahr 2024.



## Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken

Moderne Gesellschaften sind in einer zunehmend vernetzten Welt mit einer steigenden Vielfalt von Herausforderungen sowie potenziellen Krisen konfrontiert. Die Politik ist gefordert, Fähigkeiten und Strukturen zu fördern, die es ermöglichen, sich auf plötzliche krisenhafte Ereignisse, Entwicklungen und Schocks vorzubereiten, diese zu bewältigen und auf Basis zuvor gemachter Erfahrungen betroffene Systeme anzupassen und zu verbessern. Die Untersuchung geht der Frage nach, wie die Krisenvorhersage in Bezug auf den vorbeugenden Ansatz der Resilienz verbessert und im politischen Raum verankert werden kann. Dazu wurden vier Gutachten sowie die Ergebnisse eines öffentlichen Fachgesprächs ausgewertet und das Gesundheits- und das Verkehrssystem einer Resilienzanalyse unterzogen. Auf dieser Basis wurden Handlungsoptionen zur Verbesserung der Krisenvorsorge und Gestaltung einer transformativen Resilienzpolitik entwickelt, die im ersten Halbjahr 2024 mit dem TAB-Arbeitsbericht Nr. 209 veröffentlicht werden.



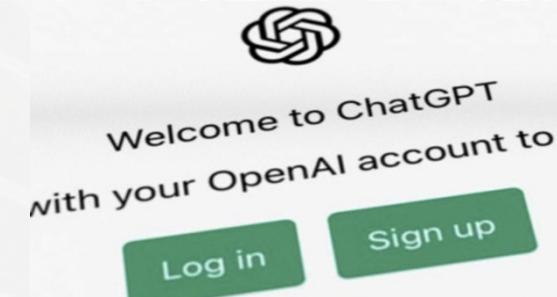
## TA-Kompakt-Studien

### Vertiefte Untersuchung zu ChatGPT und vergleichbaren Systemen

Mit der Vorstellung von ChatGPT durch das Unternehmen OpenAI im November 2022 wurde für eine breite Öffentlichkeit sicht- und erlebbar, welche Möglichkeiten der Verarbeitung natürlicher Sprache mit KI-Systemen bestehen. Die bereits diskutierten Anwendungen insbesondere in Bildung und Wissenschaft fordern bestehende Praktiken des Lernens und der Wissensverarbeitung heraus, bergen aber auch Chancen. Um auf diese neue Entwicklung zu reagieren, hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung das TAB im Februar 2023 beauftragt, ChatGPT und vergleichbare Computermodelle zur Sprachverarbeitung vertieft zu untersuchen und ihre Auswirkungen in technischer, sozialer und ethischer Hinsicht zu analysieren. Ein spezieller Fokus lag dabei auf Bildungsprozessen in Schule, Hochschule und der Aus- und Weiterbildung. Die als [Hintergrundpapier Nr. 26](#) veröffentlichten Ergebnisse wurden am 26. April 2023 im Rahmen eines [öffentlichen Fachgesprächs im Ausschuss](#) vorgestellt und diskutiert.

### Auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk – Wissenslücken und Forschungsbedarfe aus Sicht der Technikfolgenabschätzung

Die jüngsten Fortschritte in der Kernfusionstechnologie haben die Aufmerksamkeit der Medien und der Öffentlichkeit auf sich gezogen. Trotz dieser Meilensteine ist der Weg zur Verwirklichung kommerzieller Kernfusionskraftwerke noch weit und erfordert langfristige Anstrengungen in der Grundlagen- und angewandten Forschung sowie der ingenieurtechnischen Entwicklung. Dabei ist die Überwindung der technologischen Herausforderungen allein noch keine Garantie für den großtechnischen Einsatz von Fusionskraftwerken zur Stromerzeugung. Fragen im Zusammenhang mit möglichen Fusionskraftwerken stellen sich auch bezüglich der wirtschaftlichen Rentabilität, der Umwelteigenschaften, der sozialen Nachhaltigkeit sowie der Dual-Use-Aspekte und der möglichen Weiterverbreitung von Know-how und Materialien für Kernwaffen. Eine im Dezember gestartete Kurzstudie, in Auftrag gegeben vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung wird bis März 2024 den aktuellen Sachstand der Kernfusionsforschung aufzeigen und dabei Wissenslücken und weitere Forschungsbedarfe auf dem Weg zu möglichen Fusionskraftwerken identifizieren.



---

## Foresight-Aktivitäten

Im Kontext zahlreicher Krisen und Disruptionen wird die Radar- und Orientierungsfunktion parlamentarischer TA zunehmend wichtiger. Deshalb bauen wir unsere Foresight-Aktivitäten aus, indem das bestehende Horizon-Scanning um ein Resilienz-Radar sowie einen vertiefenden Resilienz-Check ergänzt wird. Die Arbeit an diesen Erweiterungen begann im Herbst 2023 mit der datengestützten Analyse technologischer Trends, mit denen systemische Risiken und Herausforderungen für kritische Infrastruktursysteme einhergehen. Die Publikation der Ergebnisse erfolgt voraussichtlich im Frühjahr 2024 mit dem ersten Foresight-Report.

---

### Horizon-Scanning

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

The logo for 'Horizon SCANNING' is displayed. The word 'Horizon' is in a large, bold, red sans-serif font. The word 'SCANNING' is in a larger, bold, black sans-serif font, positioned directly below 'Horizon'.

---

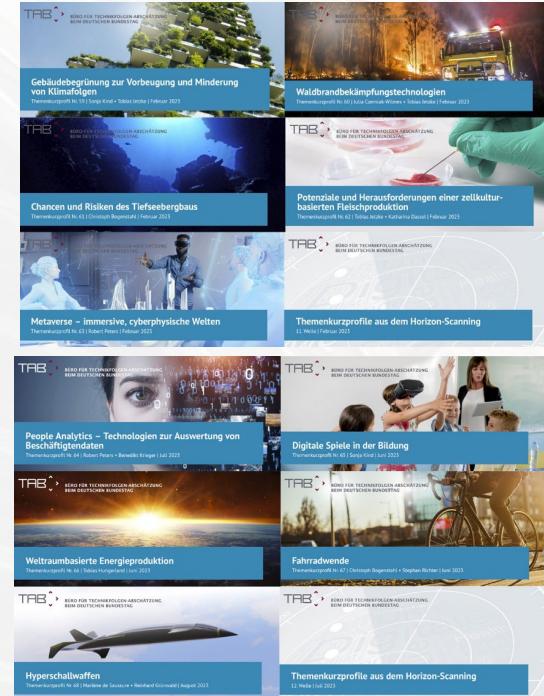
### Themenkurzprofile

Die Themenkurzprofile aus dem Horizon-Scanning bieten auf ca. zehn Seiten einen kompakten Überblick über ausgewählte wissenschaftlich-technische Trends und ihre Relevanz für Politik und Gesellschaft. Neben einer zusammenfassenden Einführung und dem Stand der jeweiligen wissenschaftlich-technischen bzw. sozioökonomischen Entwicklung umfassen sie Vorschläge für eine vertiefte Bearbeitung und weiterführende Literatur.

Die zehn Themenkurzprofile des Jahres 2023 gehen auf 36 Themenskizzen zurück, aus denen nach umfassender Diskussion im TAB-Team zehn Themen aufgrund ihrer Relevanz im gesellschaftlichen Diskurs und im Hinblick auf potenzielle gesetzgeberische Handlungsbedarfe ausgewählt wurden.

## Themenkurzprofile

- Gebäudebegrünung zur Vorbeugung und Minderung von Klimafolgen
- Waldbrandbekämpfungstechnologien
- Chancen und Risiken des Tiefseebergbaus
- Potenziale und Herausforderungen einer zellkulturbasierten Fleischproduktion
- Metaverse – immersive, cyberphysische Welten
- People Analytics – Technologien zur Auswertung von Beschäftigtendaten
- Digitale Spiele in der Bildung
- Weltraumbasierte Energieproduktion
- Fahrradwende
- Hyperschallwaffen



## TAB-Ergebnisse im Bundestag

Mit unseren Arbeitsergebnissen bedienen wir in erster Linie den Informationsbedarf der Mitglieder des Deutschen Bundestages und seiner Ausschüsse. Die TAB-Berichte gehen als Bundestagsdrucksachen in den parlamentarischen Prozess ein und werden in Plenardebatten sowie Ausschusssitzungen behandelt. Darüber hinaus organisiert das TAB in Kooperation mit dem Sekretariat des AfBFT und der Berichterstattergruppe TA bundestagsinterne sowie öffentliche Veranstaltungen, bei denen im Austausch mit Expert/innen und/oder der Öffentlichkeit Informationen erarbeitet (Werkstattgespräche) oder aber Ergebnisse diskutiert werden (Fachgespräche, TA im Dialog).

### Im Plenum des Bundestages

10.02.2023 [Einfluss von Algorithmen in digitalen Medien auf die Meinungsbildung](#)

[Projektseite](#)

21.04.2023 [Beratung über Technikfolgenanalyse zu Data-Mining](#)

[Projektseite](#)



In Parlamentsmedien

[mitmischen.de](#) (15.03.2023), Wie mächtig sind Algorithmen?

[mitmischen.de](#) (15.03.2023), „Jede Nachricht beeinflusst die Meinung“. Britta Oertel, Autorin des "Algorithmen-Berichts" im Interview

---

## Zitate aus den Plenardebatten

„Politik braucht fundiertes Wissen, um Daten in politisches Handeln zu übersetzen. Hierzu haben wir mit dem TAB-Büro ein ganz ausgezeichnetes Werkzeug.“

„Die Instanz der Technikfolgenabschätzung ermöglicht es uns dagegen, vor die Themenwelle zu kommen.“

Holger Becker (SPD)

„...nur mit solchen Informationen kann das Parlament seiner Kontrollfunktion nachkommen und damit die Datennutzung in Deutschland und das Leben von uns allen verbessern.“

Maximilian Funke-Kaiser (FDP)

„Insgesamt müssen wir also sicherstellen, dass wir die Chancen von Data-Mining, wie im TAB-Bericht deutlich beschrieben, im Gesundheitswesen nutzen, aber auch die Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes berücksichtigen.“

Stephan Albani (CDU/CSU)

„Aber bei neuen Technologien dürfen wir nicht nur die Chancen betrachten, sondern wir müssen auch ein Auge auf die Risiken haben. Dafür brauchen wir eine evidenzbasierte Risikoanalyse und Technikfolgenabschätzung.“

Laura Kraft (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN)

„Gerade [bei Data-Mining im medizinischen Zusammenhang] gilt es, den enormen potenziellen Nutzen hervorzuheben, und daher eignet sich das Thema für eine exemplarische Abwägung zunächst sehr gut.“

Tobias Matthias Peterka (AfD)

„Gut so, dass das Büro für Technikfolgenabschätzung in diesen Tagen auch ein Konzept vorgelegt hat, wie wir hier in unserer Diskussion mit ChatGPT weiter umgehen können.“

„Hier wie anderswo gilt für Medienpolitik: Wenn es technologische Entwicklungen gibt, dann muss sich der Bundestag auch in technologischen Fragen selbst qualifizieren.“

Dr. Petra Sitte (DIE LINKE)

---

## In Ausschusssitzungen

18.01.2023 **Bericht zum Thema "Urbaner Holzbau" im Ausschuss für Wohnen, Stadtentwicklung, Bauwesen und Kommunen** ([Tagesordnung](#))

26.04.2023 **Expertengespräch zum Thema "ChatGPT" im AfBFT**

Grundlage des Gesprächs war ein Hintergrundbericht des Büros für Technikfolgenabschätzung (TAB) zum Thema ChatGPT und andere KI-gestützte Sprachmodelle.

- [Pressemitteilung des Bundestages vom 21. April 2023: Forschungsausschuss lädt Sachverständige zur Diskussion über Auswirkungen von ChatGPT ein](#) (mit Statements der Mitglieder der Berichterstattergruppe TA zur Anhörung und zur Studie)
- [Bericht, Mitschnitt und Stellungnahmen](#)

In Parlamentsmedien

[das-parlament.de](#) (02.05.2023,) Zwischen Begeisterung und Skepsis: Wie ChatGPT den Schulalltag verändert. Weiterführende Informationen im [Dossier KI-Revolution der E-Paper-Ausgabe](#)

14.06.2023 **Bericht zum Thema "Data Mining" im AfBFT** ([Tagesordnung](#))

29.11.2023 **Bericht zum Thema „Data Mining“ im Ausschuss Digitales** ([Tagesordnung](#))

13.12.2023 **Berichte zum Thema „Digitalisierung der Landwirtschaft“ im Ausschuss für Ernährung und Landwirtschaft** ([Tagesordnung](#))

---

## Im Werkstattgespräch

25.05.2023 [\*\*Chancen und Risiken von Wasserstoffpartnerschaften und -technologien in Entwicklungsländern\*\*](#)

## Internationale Zusammenarbeit

### Generative KI im Fokus des EPTA-Netzwerks und seiner Mitglieder

Im EPTA-Netzwerk arbeiten die TA-Einrichtungen europäischer Parlamente seit 1990 zusammen, um die Beratung der Abgeordneten zu wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen inhaltlich und methodisch weiter zu verbessern. Im Jahr 2023 hat Katalonien die Präsidentschaft von Deutschland übernommen. Auch wenn die Berichte und Strategepapiere der EPTA-Mitglieder ein breites Spektrum wissenschaftlich-technologischer Entwicklung abbilden und beim Direktorentreffen in Girona auch das Thema „Wasserknappheit“ diskutiert wurde, stellte die EPTA-Konferenz am 9. Oktober 2023 in Barcelona die gesellschaftlichen und politischen Herausforderungen generativer KI für politische Entscheidungsträger, Zivilgesellschaft und Regulierungsbehörden in den Mittelpunkt. Dabei konnte nicht nur die Debatte zum Thema generative KI und ihre möglichen Auswirkungen auf Demokratie, Bildung, Arbeit und Gesundheit vertieft, sondern auch die internationale Kooperation sowie der Austausch von Wissenschaft und Politik(beratung) weiter gestärkt werden.



Blick in den Konferenzraum im katalanischen Parlament



Blick auf das Panel der Session zum Thema Generative KI und Bildung (v.l.n.r. Carles Sierra, Steffen Albrecht, Enkelejda Kasneci)

### Aktivitäten im EPTA-Netzwerk 2023

- EPTA-Fokusgruppe zum Thema ChatGPT am 15.03.2023
- EPTA Direktorentreffen in Girona, 15.-16.05.2023
- EPTA report "Generative Artificial Intelligence – Opportunities, Risks, and Policy Challenges", (Oktober 2023)
- EPTA Konferenz in Barcelona zum Thema "Generative Artificial Intelligence – Opportunities, Risks, and Policy Challenges", 09.10.2023
- EPTA Council in Barcelona, 10.10.2023, Übergabe der Präsidentschaft für 2024 an Norwegen
- EPTA Austausch Practitioners and communications officers 30.11.2023 (online)

## Ausbau der Wissenschaftskommunikation

### Kooperation mit dem Science Media Center

Um die Sichtbarkeit der TA innerhalb und außerhalb des Bundestages zu erhöhen, wurden die Aktivitäten des TAB im Bereich Wissenschaftskommunikation weiter ausgebaut. In der Kommunikation nach außen trug die Kooperation mit dem Science Media Center (SMC) erste Früchte. Das SMC bereitet Ergebnisse ausgewählter TAB-Untersuchungen zusammen mit einordnender Expertise von Fachleuten gezielt für die mediale Berichterstattung auf. Im Jahr 2023 wurde über die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Themen Sustainable Cooling und Bakteriophagen berichtet, woraus jeweils eine Vielzahl an Artikeln bzw. Sendungen in Qualitätsmedien resultierte.

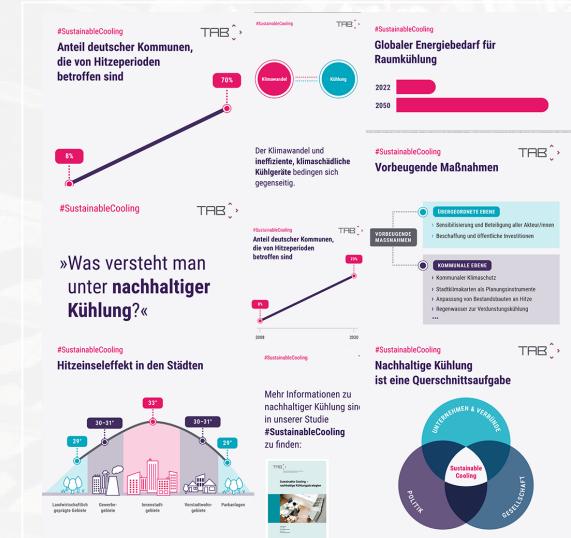
### Ausbau der Social-Media-Aktivitäten

Die sozialen Medien verändern sich derzeit in rasantem Tempo. Etablierte Kanäle wie Twitter werden umgebaut, neue Plattformen und Dienste ergänzen das Angebot und tragen zur Diversifizierung von Zielgruppen bei. Das TAB beobachtet diese Entwicklungen und erweiterte sein Portfolio an Social Media Kanälen (bisher: Twitter/X, LinkedIn, Instagram, Mastodon) um die Kurznachrichtendienste Bluesky und Threads (seit 12/2023).

Für das Auftreten des TAB in den sozialen Medien wird derzeit das Erscheinungsbild in Zusammenarbeit mit einer Kommunikationsagentur weiterentwickelt. Erste Ergebnisse wurden für die Kommunikation der Ergebnisse der Studie zu Sustainable Cooling genutzt.



Schlagzeilen ausgewählter Printmedien zur Veröffentlichung des TAB-Arbeitsberichts Nr. 206 zum Thema »Bakteriophagen«



Sharepic-Auwahl #SustainableCooling

## TAB in den Medien

Ob Studienergebnisse oder Fachgespräche – die Aktivitäten des TAB erfreuten sich im Berichtszeitraum einer wachsenden Aufmerksamkeit in zahlreichen überregionalen Tageszeitungen sowie in weiteren einschlägigen Medien und Onlinequellen.

Hier eine Auswahl:

- [heise.de](#) (12.01.2023), Roboterjournalismus: Dutzende Artikel bei US-Newsportal von KI verfasst.
- [saechische.de](#) (16.01.2023), Wie die TU Dresden den Deutschen Bundestag berät.
- [welt.de](#) (+) (02.02.2023), „Atomkraft und die Folgen: Ich halte das manchmal gar für Scharlatanerie“. Interview mit Armin Grunwald
- [zeit.de](#) (10.02.2023), Künstliche Intelligenz. Bundestag lässt Auswirkungen von ChatGPT auf Bildung untersuchen.
- [table.media](#) (15.02.2023), Bundestag fordert Blitz-Gutachten zu ChatGPT
- [handelsblatt.de](#) (16.02.2023), „Da brennt die Hütte“ – Bauministerin

Geywitz bringt Bau- und Wohnungswirtschaft gegen sich auf.

- [vegconomist.de](#) (02.03.2023), Bericht an den Bundestag sieht großes Potenzial von kultiviertem Fleisch und betont die Rolle von öffentlichen Investitionen.
- [mitmischen.de](#) (15.03.2023), „Jede Nachricht beeinflusst die Meinung“. Interview mit Britta Oertel, Autorin des "Algorithmen-Berichts".
- [mitmischen.de](#) (15.03.2023), Wie mächtig sind Algorithmen? Ein Beitrag über die
- [biopress.de](#) (22.03.2023), Bio-Reaktor statt Landwirtschaft? Zelluläre Ersatzprodukte stehen in den Startlöchern.
- [heise.de](#) (26.03.2023), Missing Link: Ausverkauf der Gesundheitsdaten im Namen der Forschung.
- [handelsblatt.com](#) (+) (24.04.2023), Herausforderungen beim Forschungszentrum
- [merkur.de](#) (25.04.2023) KI-Chatbots: Bundestags-Studie rechnet mit „nicht absehbaren Entwicklungen“.
- [helmholtz.de](#) (25.04.2023), Generative KI. Was ChatGPT für Bildung und

Wissenschaft bedeutet. Steffen Albrecht im Interview

- [idw-online.de](#) (26.04.2023), KIT-Experte zu aktuellem Thema: „Die Gesellschaft muss sich klarmachen, auf was sie sich mit ChatGPT einlässt.“
- [baden-tv.com](#) (28.04.2023), Die Schulaufgabe oder die Unihausarbeit – Wie verändert ChatGPT unser Bildungssystem?
- [taz.de](#) (28.04.2023/04.05.2023), ChatGPT und Fachkräftemangel: KI hat Bock auf Arbeit.
- [faz.net](#) (30.04.2023) Hausaufgaben machen mit ChatGPT? Künstliche Intelligenz wird das Lernen an Schulen und Hochschulen verändern.
- [mitmischen.de](#) (02.05.2023) Chancen und Risiken von ChatGPT.
- [pt-magazin.de](#) (04.05.2023), ChatGPT und Co bieten Gefahren und Chancen.
- [soundcloud.com/karlsruherinstitutfuer-technologie](#) (09.05.2023), Weder Papagei noch Superintelligenz – Forschende des KIT zu den Auswirkungen des ChatGPT

- [egovernment.de](#) (12.05.2023) Chat-GPT. Podcast "UNBÜROKRA-TISCH" Folge 7 ([ab 11:46](#))
- [mdr.de](#) (22.05.2023) Siesta bald auch bei uns? Wie sich Deutschland im Klimawandel abkühlen kann
- [telepolis.de](#) (23.05.2022), CCS als Klimawunderwaffe: Die Renaissance einer fossilen Propagandalüge.
- [table.media](#) (+) (24.05.2023), Teufelskreis: Mehr Klimaerwärmung durch mehr Klimaanlagen
- [sueddeutsche.de](#) (+) (26.05.2023), Künstliche Intelligenz im Bundestag. Das macht dann die KI.
- [zdf.de](#) (27.05.2023) Klimakiller Klimaanlage: Hitze-Schutz: So kühlt man klimafreundlich.
- [deutschlandfunknova.de](#) (05.06.2023), Was Klimaanlagen so schädlich macht.
- [zeit.de](#) (+) (12.06.2023), Bargeld. Diese Scheine trügen nicht.
- [wdr.de](#) (19.06.2023), Klimaanlagen - Wie können wir umweltfreundlicher kühlen?
- [handelsblatt.com](#) (27.06.2023), Deepfakes. Wie KI zur Gefahr für die Demokratie werden könnte. (Mit Einschätzungen von Armin Grunwald)
- [heise.de](#) (18.07.2023), Empfehlung von Expertenrat: Heilende Phagen schneller in die Praxis bringen.
- [br.de](#) (19.7. 2023/14.08.2023), Bakteriophagen: Bundestagsexperten empfehlen Förderung. Audiobeitrag (14:08)
- [br.de](#) (20.07.2023), Phagen gegen Antibiotikaresistenzen: Mehr Forschung gefordert.
- [sueddeutsche.de](#) (20.07.2023), Antibiotikaresistenzen: Kampf der Winzlinge.
- [dw.com](#) (21.07.2023) Bakteriophagen vs. Antibiotika: Mit Viren gegen Resistenzen
- [ardaaudiothek.de](#) (23.07.2023), Viren gegen Bakterien.
- [fr.de](#) (27.07.2023), Behandlung mit Phagen könnte eine Alternative zu Antibiotika sein.
- [spektrum.de](#) (27.07.2023), Blasenentzündung: Mit Phagen gegen resistente Krankheitserreger.
- [vdi-nachrichten.com](#) (+) (09.08.2023), Mit Bakteriophagen gegen Krankenhauskeime
- [taz.de](#) (21.08.2023), Phagen als Alternative zu Antibiotika: Resistent gegen Resistenzen.
- [nd-aktuell.de](#) (24.08.2023), Virus kontra Bakterium.
- [focus.de](#) (25.08.2023) Hilfreiche Killer.
- [heise.de](#) (01.10.2023), E-Voting: Bedrohung durch Cyberattacken und Vorwürfe der Wahlmanipulation.
- [euwid-wasser.de](#) (+) (15.11.2023), Bericht: Weg zu umfassend vernetzter „Wasserwirtschaft 4.0“ ist noch weit.
- [egovernment.de](#) (05.12.2023), Löst E-Voting die Brief- und Urnenwahl ab?

Weitere Onlinebeiträge  
in unserem [Medienspiegel](#)

## Welche TAB-Publikationen wurden am häufigsten abgerufen?

### TAB-Publikationen nach Downloads im Jahr 2023 (TOP-10)

1. 8862 Downloads: [ChatGPT und andere Computermodelle zur Sprachverarbeitung](#).
2. 5020 Downloads: [What happens during a blackout](#).
3. 4283 Downloads: [Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke. Monitoring](#).
4. 3562 Downloads, [Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft](#).
5. 3532 Downloads: [Electronic petitioning and modernization of petitioning systems in Europe](#).
6. 3422 Downloads: [Aktueller Stand und Entwicklungen der Pränataldiagnostik](#).
7. 3311 Downloads: [Algorithmen in digitalen Medien und ihr Einfluss auf die Meinungsbildung](#).
8. 2646 Downloads: [Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden....Stromausfalls](#).
9. 2322 Downloads: [Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften... -](#)
10. 2315 Downloads: [Virtual und Augmented Reality: Status quo,... und zukünftige Entwicklungen](#).

### Webseitenbesuche

Im Berichtszeitraum wurden laut Webanalyse im Vergleich zum Vorjahr etwa 2% weniger Besuche auf tab-beim-bundestag.de verzeichnet. Dafür erreichten wir mit knapp 53 Tsd. unterschiedlichen Besuchern deutlich mehr als 2022.

	Unterschiedliche Besucher	Anzahl der Besuche	Zugriffe
2022	50.210	238.826	3.525.210
2023	52.797	230.743	3.085.889

### Abrufstatistik TAB-Publikationen

sortiert nach Downloads und Seitenaufrufen im Repository KITopen

seit Einstellung in KITopen*	im Jahr	im Jahr
Alle TAB-Publikationen	2022	2023
TAB-Berichte	2022	2023
TAB-Fokus	2022	2023
Themenkurzprofile	2022	2023
TAB-Sensor	2022	2023
TAB-Briefe**	2022	2023
Bücher***	2022	2023
TAB Publications (in English)	2022	2023

Eine ausführliche Abrufstatistik zu allen TAB-Publikationen sowie eine Top Ten des Monats vom zentralen Open-Access-Repository KITopen steht online zur Verfügung.

Zugriffe auf TAB-Publikationen in anderen Bibliotheksrepositorien sowie die als Bundestagsdrucksachen zur Verfügung gestellten [TA-Untersuchungen im Dokumentations- und Informationssystem des Parlaments - DIP](#) (gemäß § 56a der GO) oder von der Webseite des Bundestages gehen nicht in die Zählung ein.

[Zur Publikationsstatistik](#)

## Die Berichterstattergruppe TA

Die Berichterstattergruppe TA wird zu Beginn jeder Legislaturperiode aus je einem Mitglied der Fraktionen (oder Gruppen) im Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung neu gebildet.

Die Gruppe tagt – gemeinsam mit dem Ausschussvorsitzenden und Vertreter/innen des TAB – in der Regel monatlich und bereitet alle das TAB und seine Organisation betreffenden Entscheidungen des Ausschusses vor: vom Beschluss über die Durchführung eines TA-Vorhabens und zugehörige Gutachtenvergaben bis zur Abnahme des Abschlussberichts. Dabei orientiert sie sich am Konsensprinzip.

### Mitglieder in der aktuellen Wahlperiode (2021-2025)



**Kai Gehring**   
Vorsitzender des  
Ausschusses  
Bündnis 90/Die  
Grünen



**Dr. Holger Becker**   
SPD



**Lars Rohwer**   
CDU/CSU



**Laura Kraft**   
Bündnis 90/Die  
Grünen



**Prof. Dr. Stephan  
Seiter**   
FDP



**Prof. Dr.-Ing. ha-  
bil. Michael Kauf-  
mann**   
AfD



**Ralph Lenkert**   
Die Linke  
(bis 6.12.2023)

Die politische Steuerung des TAB liegt entsprechend dem § 56a der Geschäftsordnung des Deutschen Bundestages in den Händen des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung. Dazu bildet er eine Berichterstattergruppe TA, Das Sekretariat des Ausschusses unterstützt die Kommunikation zwischen TAB und den Gremien und Mitgliedern des Deutschen Bundestages.

## Das TAB

Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) – auf Basis eines Vertrags mit dem Deutschen Bundestag – betrieben. Seit September 2013 kooperiert das KIT beim Betrieb des TAB mit dem IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH und der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH. Standort des TAB und seines interdisziplinären Teams ist Berlin.

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)  
Neue Schönhauser Straße 10 | 10178 Berlin  
[www.tab-beim-bundestag.de](http://www.tab-beim-bundestag.de)



## Bildnachweise

Titel und Umschlag: TAB/Bernd Stegmann  
S. 5: iodrakon/iStock  
S. 6: Andreus/123rf; vectorlab/123rf  
S. 7: jvdwolf/123rf.com; andriiboroda/rf

S. 8: spoooh/iStock; pitinan/123rf  
S. 9: natanaelgingting/freepik  
S. 10: MPI für Plasmaphysik/Jan Hosan  
S. 13: DBT/Thomas Köhler/photothek

S. 15: Parlament de Catalunya, 9/10/23



