

# ZERO EMISSION AVIATION – EMISSIONSFREIE LUFTFAHRT

WHITE PAPER DER DEUTSCHEN LUFTFAHRTFORSCHUNG



**BDLI** 

  
DLR

# PRÄAMBEL

Das vorliegende White Paper wurde vor dem Ausbruch der Corona-Pandemie angefertigt.

Obwohl die Folgen des Virus für die Luftfahrt heute noch nicht zuverlässig vorausgesagt werden können, beweisen der weltweite Einbruch des Flugbetriebs und die derzeit anhaltenden Reisebeschränkungen, dass die Luftfahrtbranche zu den am stärksten betroffenen Wirtschaftszweigen der Pandemie gehört und sich voraussichtlich als einer der letzten von den Auswirkungen erholen wird.

Die Pandemie hat das Potenzial die Luftfahrt zu verändern, doch die Vision eines emissionsfreien Luftverkehrs bleibt davon unberührt. Jetzt ist der Zeitpunkt, die Weichen für eine erfolgreiche Energiewende in der Luftfahrt zu stellen. Dieses Dokument führt dafür den aktuellen Forschungsstand, den Forschungs- und Technologiebedarf sowie Handlungsempfehlungen auf.

# STATEMENTS



Das DLR forscht seit vielen Jahren an Technologien für eine nachhaltige Luftfahrt. Unsere Ergebnisse sind Technologien in einem vorwettbewerblichen Reifegrad, während der Transfer in marktreife Produkte in der Industrie erfolgt. Das vorliegende White Paper fasst den heutigen Kenntnisstand für einen „Green Deal“ der Luftfahrt von Morgen zusammen. Es enthält nicht nur unsere Forschungssicht, sondern durch die Zusammenarbeit mit Unternehmen im BDLI auch die Sicht der Umsetzbarkeit. Ich freue mich sehr, dass es uns zusammen gelungen ist, ein solch umfassendes Dokument der Politik zur Verfügung stellen zu können. In Deutschland wird die Luftfahrtforschung von der Politik stark unterstützt: Auf regionaler Ebene über Länderinitiativen, auf nationaler Ebene über das Luftfahrtforschungsprogramm sowie die Förderung des DLR und auf internationaler Ebene durch Beteiligungen an EU-Förderprogrammen. Insofern ist dieses White Paper auch ein Ergebnis dieser Unterstützung. Das DLR steht bereit, möglichst viel davon mit unseren Industriepartnern für eine „Zero Emission Aviation - ZEMA“ umzusetzen.

Prof. Rolf Henke  
DLR-Luftfahrtvorstand



Wir wollen, dass das Flugzeug der Zukunft in Deutschland und Europa gebaut wird. Als innovative Industrienation wollen wir der Pionier des klimaneutralen Fliegens sein. Deutschland verfügt über ein starkes Forschungsnetz mit ausgezeichneten Einrichtungen, die gemeinsam mit der Industrie die technologischen Grundlagen des klimaneutralen Fliegens schaffen werden. Deshalb hat der BDLI gemeinsam mit dem DLR ein White Paper erstellt, in dem die für unsere Zukunft des klimaneutralen Fliegens essenziellen Technologien aufgezeigt werden. Jetzt geht es darum, diese im Schulterschluss zwischen Forschung, Politik und Industrie umzusetzen. Denn die Energiewende am Himmel gelingt nur mit gesamtgesellschaftlichen Anstrengungen.

Reiner Winkler  
BDLI-Vizepräsident Luftfahrt

# ZUSAMMEN- FASSUNG

Der Weg hin zu einer klimaneutralen Luftfahrt bedarf radikaler Technologien in allen Bereichen. Neben revolutionären Flugzeug- und Antriebskonzepten spielen auch synthetische Kraftstoffe und Flugführung eine zentrale Rolle. Die erfolgreiche Einführung solcher Konzepte erfordert eine transdisziplinäre Forschung an Technologie-, Betriebs- und Wirtschaftsfaktoren. Bislang fehlt ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand in den verschiedenen Forschungsdisziplinen. Daher haben das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie (BDLI) die derzeitige Forschung und die aktuellen technologischen Handlungsfelder zusammengeführt, zeigen damit die Richtung für eine emissionsfreie Luftfahrt auf und unterstützen die Technologiestrategien von Forschung, Industrie und Politik.

Die globale Luftfahrt ist für etwa 2,5 % der menschengemachten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich und trägt auch durch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte zur Erderwärmung bei. Darüber hinaus verschärft der Anstieg des Luftverkehrsaufkommens die Situation zusätzlich. Zentrale Herausforderung ist es demnach, die Folgen für Mensch und Umwelt zu minimieren. Das Zusammenspiel aller Faktoren ist bisher noch unzureichend erforscht und muss als Entscheidungsgrundlage für Industrie und Politik besser verstanden werden.

Die evolutionäre Weiterentwicklung von Gasturbinenkonzepten in Verbindung mit synthetischen Kraftstoffen ermöglicht bereits kurzfristig einen signifikant emissionsreduzierten Luftverkehr. Drop-in-Kraftstoffe benötigen keine Änderungen am Triebwerk und können bereits heute die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 40 % reduzieren. Durch neue Kraftstoffdesigns können zudem 50–70 % der Ruß- und Partikelemissionen vermieden werden. Die Wirkungen von Drop-in-Kraftstoffen lassen sich durch höhere Beimischungsraten von mehr als 50 % maximieren. Hindernisse für eine Einführung in großen Mengen sind derzeit die Produktionskapazität und der Preis. Near-Drop-in-Kraft-

stoffe können durch Co-Optimierung von Kraftstoff und Brenner die CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 80 %, die Ruß- und Partikelemissionen um bis zu 90 % und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um beinahe 100 % reduzieren. Weitere Verbesserungen sind durch die Nutzung von Non-Drop-in-Kraftstoffen wie Wasserstoff möglich, denn dadurch können die lokalen Emissionen von CO<sub>2</sub>, Ruß und Aerosolvorläufern auf null reduziert werden. Die Klimawirkungsvorteile von Wasserstoff sind jedoch stark vom Herstellungspfad abhängig. Deshalb ist es für eine CO<sub>2</sub>-Minderung nur sinnvoll, Wasserstoff einzusetzen, der aus regenerativen Quellen erzeugt wurde. Es müssen also neben technischen Entwicklungen insbesondere nachhaltige Herstellungspfade entwickelt und gefördert werden.

Revolutionäre Wärmekraftmaschinenkonzepte haben das Potenzial nahezu emissionsfrei zu sein. Sie können in konventionellen Flugzeugen mit Drop-in-Kraftstoffen sowie in neuartigen Luftfahrzeugen mit Wasserstoff betrieben werden. Trotzdem nehmen derartige Antriebskonzepte Einfluss auf das Klima, der bis heute noch nicht vollständig verstanden ist. Um ein klares Bild zu erhalten, bedarf es weiterer Forschung und Technologieentwicklung.

Elektrische Antriebe sind die derzeit einzige bekannte Alternative, die ohne Emissionen am Flugzeug auskommt.

Flugzeuge mit batterie-elektrischem Antrieb sind im Betrieb komplett emissionsfrei. Wegen der geringen Energiedichte von aktuellen Batterietechnologien erlauben sie jedoch nur eine relativ geringe Reichweite von rund 300 km. Daher eignen sich diese Luftfahrzeuge insbesondere für den Bereich der Urban Air Mobility und für Reisen innerhalb von Ballungszentren oder als Zubringerflugzeuge. Durch die Kombination von unterschiedlichen Energiespeichern in hybriden Antrieben kann die Reichweite deutlich gesteigert werden. Turbohybrid-elektrische Antriebssysteme mit alternativen Kraftstoffen

erlauben so einen emissionsfreien batterie-elektrischen Betrieb am Flughafen und gleichzeitig einen mindestens CO<sub>2</sub>-neutralen Betrieb im Reiseflug. Aus heutiger Sicht hat die Brennstoffzelle in Verbindung mit grünem Wasserstoff langfristig das Potenzial, ausreichende Leistung und Reichweite für die kommerzielle Luftfahrt bereitzustellen. Damit wäre ein weitgehend emissionsfreier Luftverkehr möglich. Aktuelle Ergebnisse zeigen, dass ein reines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Flugzeug realisierbar sein sollte.

Da die Technologiereife alternativer Antriebslösungen für die Luftfahrt derzeit noch sehr gering ist, besteht großer Forschungsbedarf in zahlreichen Bereichen: Leistungs- und Energiedichte von allen Komponenten im System müssen erhöht werden; Lösungen für eine effiziente Speicherung von Wasserstoff müssen gefunden werden; im Bereich Brennstoffzelle muss das Wärmemanagement optimiert und eine revolutionäre Kühltechnologie entwickelt werden; weiterhin ist das Potenzial emissionsreduzierender Strukturen noch nicht ausgeschöpft. Darüber hinaus müssen die Auswirkungen neuer Antriebe auf das gesamte Flugzeug untersucht werden und die aktuelle Flughafeninfrastruktur mit einbezogen werden. Um diese Fragestellungen zu beantworten, sind sowohl numerische Analysen als auch systematische experimentelle und reale Flugversuche mit geeigneten Demonstratoren erforderlich.

Die Entwicklung zulassungsfähiger Technologien für klimaneutrale (Langstrecken-) Flugzeuge ist bis 2040 möglich. Die Marktdurchdringung bis zur kompletten Flottenerneuerung erfordert enorme industrielle Anstrengungen.

Während die Einführung einer neuer Technologien für die Weltflugzeugflotte langwierig ist, könnten neue operative Maßnahmen wie die Implementierung eines klimaschonenden Routings bereits in kürzester Zeit auf einen wesentlichen Teil der Flotte angewendet werden. Studien des DLR zeigen, dass bereits kleine Änderungen in der Flugführung mit lediglich um 1 % erhöhten Betriebskosten zu einer Verringerung der Klimaauswirkungen um bis zu 10 % führen.

Für das Ziel eines klimaneutralen Luftverkehrs darf der ökonomische Flugzeug-Lebenszyklus jedoch nicht außer Acht gelassen werden: Aspekte wie automatisierte Produktionsprozesse, die Digitalisierung in der Luftfahrt, die Verbindung von Konzept, Design und Fertigung sowie Wartungsdaten spielen eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung und Einführung neuer Produkte. Ein klimaneutrales Flugzeug muss in den operationellen Kontext gesetzt werden. Möglicherweise erhöhte Kosten könnten durch ein einzigartiges Reiseerlebnis kompensiert werden. Hierzu notwendige Technologien müssen ebenfalls entwickelt werden.

Erst durch die enge Zusammenarbeit des Netzwerks aus Industrie, Politik und Wissenschaft sowie Förderungen auf regionaler Ebene, über das Luftfahrtforschungsprogramm sowie weitere Maßnahmen auf nationaler und EU-Ebene kann das Ziel einer emissionsfreien Luftfahrt erreicht werden.

# INHALTS- VERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>8</b>
<b>2. ZUKÜNFTIGE HERAUSFORDERUNGEN AN DEN LUFTVERKEHR</b>	<b>10</b>
2.1. Der Einfluss des Luftverkehrs auf das Klima	11
2.2. Luft- und Bodenreinhaltung sowie Umweltaspekte	13
2.3. Lärm	15
<b>3. VERBRENNUNGSBASIERTE KONZEPTE</b>	<b>16</b>
3.1. Wirkungsgradoptimierung von klassischen Gasturbinen-Antrieben	17
3.2. Wirkungsgradoptimierung durch neue thermische Turbomaschinen	18
3.3. Verbrennung von Wasserstoff in der Gasturbine	19
3.4. Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe	20
<b>4. ELEKTRISCHES FLIEGEN</b>	<b>24</b>
4.1. Batterie-elektrische Antriebssysteme	27
4.2. Turbo-hybrid-elektrische Antriebe	28
4.3. Wasserstoff-Brennstoffzellen-hybrid-elektrische Antriebe	30
4.4. Struktur und Systemintegration in der Struktur	34
4.5. Weitere Anforderungen für das elektrische Fliegen	36
<b>5. VERBESSERTE FLUGROUTEN, BODENPROZESSE UND INFRASTRUKTUR</b>	<b>38</b>
5.1. Flugführung mit minimaler Klimawirkung	39
5.2. Bodenprozesse mit minimaler Klimawirkung	41
5.3. Infrastruktur für neuartige Flugzeugantriebe	41
<b>6. DIE AUSWIRKUNG AUF FLUGZEUGEBENE</b>	<b>44</b>
6.1. Konfigurative Möglichkeiten und Herausforderungen	45
6.2. Technologiefolgenabschätzung im gesamten Flugzeug-Lebenszyklus	49
<b>7. DIE TRANSFORMATION DER LUFTFAHRTINDUSTRIE</b>	<b>52</b>
7.1. Hubschrauber	53
7.2. Kleinflugzeuge und Urban Air Mobility	53
7.3. Regionalflugzeuge	54
7.4. Kurzstrecke	54
7.5. Mittel- und Langstrecke	55
<b>8. FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEBEDARF</b>	<b>56</b>
8.1. Regionale Maßnahmen	57
8.2. Das Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo)	60
8.3. Weitere Maßnahmen auf nationaler Ebene	61
8.4. EU-Ebene	63
<b>9. FAZIT</b>	<b>64</b>

# EINLEITUNG





Hinsichtlich des globalen Wachstums des Flugverkehrs ist die wichtigste Aufgabe für Forschung und Industrie, den ökologischen Fußabdruck des Lufttransports deutlich zu reduzieren. Noch ist die Luftfahrt für lediglich 2,5 % des weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich. Zählt man die Effekte von Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen wie Wasserdampf und Stickoxid hinzu, erhöht sich der Einfluss des Luftverkehrs auf die globale Erderwärmung auf rund 5 %. Die Vision für die Zukunft der Luftfahrt ist das emissionsfreie Flugzeug (Zero Emission Aircraft) – ein Luftfahrzeug, das sowohl im Flug- als auch im Bodenbetrieb keine Schadstoffe emittiert. Dieses ambitionierte Ziel erfordert substantielle Forschungen und Entwicklungen in den Bereichen nachhaltige Kraftstoffe, Energieträger, neue Flugzeugkonzepte und Komponenten sowie alternative Antriebskonzepte.

Nachhaltige Kraftstoffe stellen ein großes Potenzial dar, da sie neben der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen die Freisetzung von Schadstoffen wie Ruß verringern. Neben synthetischen Kraftstoffen ist der Einsatz von Wasserstoff, der aus regenerativen Quellen erzeugt wurde, sinnvoll. Die derzeit geringe Produktionskapazität, der hohe Herstellungspreis und weitere technologische Verbesserungen stellen heute noch ein Hindernis dar, um herkömmliches Kerosin durch 100 % nachhaltige Kraftstoffe zu ersetzen. Die hohen Anforderungen an das zukünftige Lufttransportsystem verlangen aber nicht nur die Weiterentwicklung von bestehenden Technologien, sie fordern darüber hinaus komplett neue Ansätze, um die negativen Umweltauswirkungen zu minimieren. Elektrisches Fliegen mit Batterie oder Brennstoffzelle bietet grundsätzlich die Möglichkeit, die steigenden Mobilitätsanforderungen mit minimaler Klimawirkung zu erfüllen. Der geringe Reifegrad der Technologien erfordert jedoch vielfältige Investitionen in Entwicklung, Produktion Zulassung und Infrastrukturen.

Derzeit gibt es weder in Deutschland noch in Europa eine ausreichende Produktionskapazität für Sustainable Aviation Fuel (SAF). Um die SAF-Produktionskapazität auf ein wirksames und wirtschaftliches Level anzuheben, sind klare politische Rahmenbedingungen ebenso unverzichtbar wie wirksame Förderungsinstrumente insbesondere für die Produzenten alternativer Kraftstoffe.

Aktuell wird in drei Kategorien unterschieden:

1. Drop-in-Kraftstoffe, die mit der heutigen Infrastruktur kompatibel sind
2. Near-Drop-in-Kraftstoffe, die geringfügige Modifikationen im Flugzeug erfordern
3. Non-Drop-in-Kraftstoffe, die eine erhebliche Modifikation des Flugzeugs erfordern

Hieraus wird ersichtlich, dass der Fokus in Zukunft auf modularen und multifunktionalen Strukturen liegen muss, da hinsichtlich neuer Mobilitätskonzepte verschiedene Anwendungen mit verschiedenen Kraftstofflösungen möglich sind.

Die erfolgreiche Weiterentwicklung und Einführung neuer Technologien wird die Luftfahrt von morgen verändern. Unbemannte Prototypen-Luftfahrzeuge lassen einen Blick auf die urbane Luftmobilität der Zukunft zu. Erste Anwendungen unbemannter Luftfahrzeuge sind die Versorgung schlecht angebundener Gebiete und die Lieferung dringend benötigter Güter wie etwa Medikamente sowie die Unterstützung von Einsatzkräften bei der Katastrophenhilfe. Unbemanntes autonomes Fliegen wird aber auch als Lösung für den schnellen, emissionsarmen Personentransport in urbanen Räumen oder zwischen Städten gesehen. Während für Reisen innerhalb von Ballungsgebieten oder zum nächstgrößeren Flughafen in naher Zukunft batterie-elektrisch angetriebene Regionalflugzeuge eingesetzt werden, lösen Luftfahrzeuge mit Antriebskonzepten auf Basis von Brennstoffzellen perspektivisch heutige Flugzeuge auf der Kurz- und Mittelstrecke ab. Auf der Langstrecke werden in den kommenden Jahren neue Gasturbinenkonzepte in Verbindung mit nachhaltigen Kraftstoffen eine wichtige Technologie darstellen. Langfristig wird Wasserstoff eine zunehmend wichtigere Rolle spielen, da er eine hohe Energiedichte besitzt und aus erneuerbaren Energien gewonnen werden kann. Perspektivisch sind aber auch der Einsatz turbo-hybrid-elektrischer Antriebskonzepte und ein Brennstoffzellenantriebssystem auf der Langstrecke denkbar. Abhängig von der Kombination von Energieträger und Antriebskonzept versprechen alle Konzepte eine größere Reichweite gegenüber batterie-elektrisch angetriebenen Flugzeugen.

Neue Mobilitäts-, Antriebs- und Kraftstoffkonzepte erfordern neue und effiziente Luftfahrtstrukturen sowie damit einhergehende digitale Methoden. Die Luftfahrtstruktur von morgen muss modular und flexibel ein viel breiteres Mobilitätsspektrum bedienen, als es heute noch der Fall ist.

Um die oben beschriebenen Technologien umfassend bewerten zu können, ist eine disziplin-übergreifende Fähigkeit zum Entwurf und zur Bewertung des Gesamtsystems notwendig, welche die deutsche Luftfahrtlandschaft unbedingt wieder aufbauen, erhalten und konsequent weiterentwickeln sollte. Wesentlicher Forschungsbedarf besteht in der Komponentenentwicklung, der Integration der Komponenten in das Flugzeug sowie dem Verständnis für die Auswirkungen aller Aspekte auf der Flugzeugebene und dem Gesamtsystem Luftfahrt. Für die Weiterentwicklung der Technologien und den Sicherheitsanspruch sind Flugversuche notwendig. Dafür sollten die Luftfahrtlandschaft und Politik Investitionen für ein zielgerichtetes Demonstratoren-Programm ermöglichen, das den Weg zu einem emissionsfreien Luftverkehrstransport von morgen ebnet.

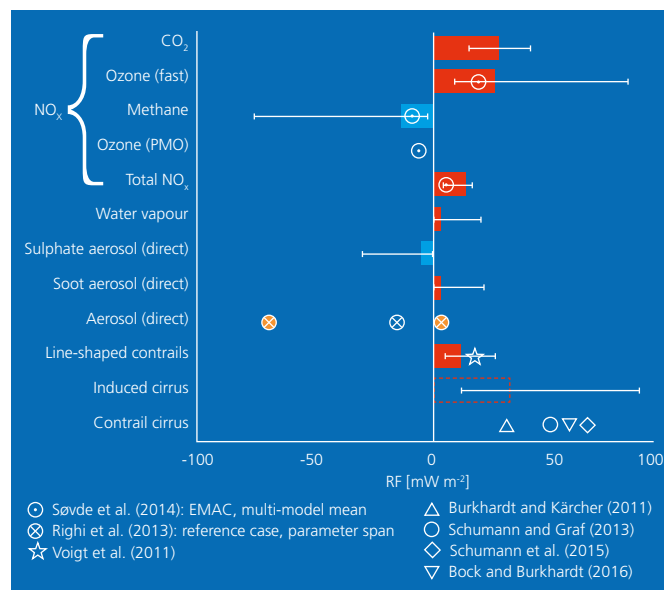
# ZUKÜNFTIGE HERAUSFOR- DERUNGEN AN DEN LUFTVERKEHR



Messungen zeigen, dass sich das Klima ändert und der globale Luftverkehr durch seinen Schadstoffausstoß zur Klimawirkung beiträgt. Die Einflüsse der unterschiedlichen Emissionsarten sind derzeit jedoch noch nicht vollständig verstanden, um die Herausforderung „Umweltschutz im Luftverkehr“ adäquat zu adressieren.

## 2.1. DER EINFLUSS DES LUFTVERKEHRS AUF DAS KLIMA

Der Luftverkehr ist für rund 2,5 % der weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 2018 verantwortlich. Der Anteil könnte sich während der kommenden Jahrzehnte bis 2050 noch verdoppeln, so die internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO. Der Einfluss von Emissionen auf die globale Erderwärmung wird durch den Strahlungsantrieb beschrieben, das heißt durch die Änderung der Gesamtenergiebilanz des Planeten, die letztlich die Temperaturänderung beeinflusst. Positive Strahlungsantriebe führen zu einer Erwärmung, negative zu einer Abkühlung. Das durch den Menschen verursachte CO<sub>2</sub> – inklusive dem aus dem Luftverkehr – verursacht einen positiven Strahlungsantrieb und führt damit zu einer Erwärmung der Erde.



Strahlungsantriebe aufgrund der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Luftverkehrs. Die Symbole beruhen auf einer Auswahl von Arbeiten, die in jüngerer Zeit erschienen.

Neben CO<sub>2</sub> tragen eine Reihe weiterer Emissionen des Luftverkehrs ebenfalls zu einer Änderung des Strahlungshaushaltes bei und liefern so einen Beitrag zur Klimaänderung. Hier sind vor allem der Wasserdampf, die Stickoxid-Emissionen, die direkten und indirekten Aerosoleffekte und Kondensstreifen-Zirren zu nennen. Diese Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte wurden schon in den 1980er und 1990er Jahren diskutiert und 1999 in einem Sonderbericht des Internationalen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC, Aviation and the Global Atmosphere) zusammenfassend vorgestellt. Es wurde geschätzt, dass der gesamte Strahlungsantrieb des Luftverkehrs für die dort untersuchten Szenarien zwischen zwei- und viermal höher war als der der CO<sub>2</sub>-Emissionen allein. Die Existenz und die Auswirkungen solcher Effekte sind zwar anerkannt,



.....

*„Es besteht großer Forschungsbedarf hinsichtlich der Klimawirkung unterschiedlicher Emissionsarten – insbesondere der Auswirkung von Wasserdampf.“*

.....

aber ihre Quantifizierung ist aufgrund der vielen komplexen nicht-linearen Prozesse bislang nur mit großen Unsicherheiten gelungen. Klar ist, der bei Weitem größte Beitrag stammt vom Reiseflug.

#### **KOHLENSTOFFDIOXID (CO<sub>2</sub>)**

CO<sub>2</sub> ist der größte Bestandteil der Flugzeugemissionen. Das Gas mischt sich in der Atmosphäre nahezu homogen mit dem gleichen direkten Erwärmungseffekt, der auftritt, wenn es aus anderen Verbrennungsquellen fossiler Brennstoffe emittiert wird. Der Kraftstoffverbrauch erzeugt unabhängig von der Flugphase CO<sub>2</sub> im Verhältnis 3,15 kg CO<sub>2</sub> pro 1 kg Kraftstoffverbrauch. Aufgrund seiner verlängerten Lebensdauer in der Atmosphäre ist CO<sub>2</sub> als Krafthausgas besonders wirksam. Nach der Emission einer bestimmten Menge des Gases wird über 30 Jahre etwa die Hälfte aus der Atmosphäre entfernt, weitere 25 % verschwinden innerhalb einiger hundert Jahre und die restlichen 25 % sind nach tausend Jahren noch in der Atmosphäre und werden nur sehr langsam entfernt.

#### **WASSERDAMPF (H<sub>2</sub>O)**

Als wesentliches Reaktionsprodukt aus der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen wie Kerosin entsteht Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) – analog zu Verbrennungsprozessen in anderen Sektoren wie dem Straßenverkehr und der Schifffahrt. Beim Luftverkehr wird ein großer Anteil des H<sub>2</sub>O jedoch in Reiseflughöhe emittiert, das heißt zwischen acht und dreizehn Kilometern Höhe. Dort ist die natürliche Hintergrundkonzentration des Wasserdampfs um mehrere Größenordnungen geringer als in Bodennähe und die atmosphärische Lebensdauer des H<sub>2</sub>O deutlich länger. Gleichzeitig ist sie mit einigen Tagen bis einigen Wochen jedoch zu gering, um eine homogene Verteilung (horizontal und vertikal) des zusätzlichen H<sub>2</sub>O zu erlauben. Daher liefert hier der Luftverkehr einen merkbaren Beitrag zur lokalen Gesamtkonzentration des

H<sub>2</sub>O. Ähnlich wie das CO<sub>2</sub> wirkt H<sub>2</sub>O im langwelligen Teil der Strahlung, also der thermischen Ausstrahlung der Erde. Die Größe des Strahlungsantriebs hängt von der Temperaturdifferenz zwischen dem Boden und der Höhe ab, in der sich die Substanz befindet. In Reiseflughöhe ist die Atmosphäre besonders kalt und somit der Strahlungsantrieb besonders groß.

Der aufgrund des Luftverkehrs zusätzliche Wasserdampf führt zu einer Erwärmung der Atmosphäre. Durch die starke Ortsabhängigkeit des Strahlungsantriebs von H<sub>2</sub>O liegt hier ein Optimierungspotenzial für die Flugführung. Außerdem besteht Forschungsbedarf hinsichtlich seines Einflusses auf Wolken.

#### **STICKOXIDE (NO<sub>x</sub>)**

Als unerwünschtes Nebenprodukt entstehen bei der Verbrennung auch Stickoxide (NO<sub>x</sub>) aufgrund der Oxidation von Stickstoff aus der Luft. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen wirken in Reaktion mit einer Vielzahl weiterer Kohlenwasserstoffe in der Atmosphäre auf die Temperatur der Erde. Das primär entstehende Ozon (O<sub>3</sub>) hat eine atmosphärische Lebensdauer von zwei bis acht Wochen und wird daher nicht homogen in der Atmosphäre verteilt. Es bewirkt vor allem im langwelligen Teil der Strahlung eine Erwärmung der Atmosphäre. Dieser Effekt ist nicht zu verwechseln mit dem Effekt des sogenannten Ozonlochs über den UV-Teil der Strahlung, mit dem Krebskrankungen in Zusammenhang gebracht werden. Ein Nebeneffekt der oben genannten O<sub>3</sub>-Produktion ist der Abbau von Methan (CH<sub>4</sub>) in der Atmosphäre und in der Folge eine Verringerung der natürlichen O<sub>3</sub>-Produktion sowie eine verringerte Bildung von stratosphärischem Wasserdampf. Die Zeitskalen dieser Prozesse liegen im Bereich von 10 Jahren und sie führen zu einer leichten Abkühlung der Erde.



Betrachtet man aber alle hier genannten Prozesse, die ursprünglich auf den  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Luftverkehrs beruhen, so führen diese in Summe zu einer Erwärmung der Erde.

#### KONDENSSTREIFEN-ZIRREN

Bei geeigneten thermodynamischen Bedingungen führen die Wasserdampfemissionen des Luftverkehrs zur Bildung von linienförmigen Kondensstreifen, die zu linienförmigen Wolken wachsen und sogenannte Kondensstreifen-Zirren bilden, die kaum noch von natürlichen Zirren zu unterscheiden sind. Die Lebensdauer solcher Wolken liegt zwischen wenigen Minuten bis zu etlichen Stunden. Je nach ihren Eigenschaften und den Strahlungsbedingungen wirken diese anthropogenen Wolken im Einzelfall erwärmend oder kühlend. Über den Globus und den ganzen Tag gemittelt erwärmen Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren gegenwärtig die Erde. Der zugehörige Strahlungsantrieb ist größer als der aus dem  $\text{CO}_2$  allein. Durch die starke Abhängigkeit der Wirkung von den lokalen Bedingungen bietet dieser Emissionsbeitrag ebenfalls das Potenzial für die Optimierung von Flugrouten.

Insbesondere hinsichtlich der Prognosefähigkeit und Kondensstreifen-Zirren bei Flugzeugen mit Wasserstoffantrieb besteht heute noch Forschungsbedarf.

#### DIREKTE UND INDIREKTE AEROSOLEFFEKTE

Der Luftverkehr emittiert sowohl Aerosole wie zum Beispiel Ruß als auch Aerosolvorläufer wie Stickstoff- und Schwefelverbindungen, aus denen sich Aerosole bilden. Diese haben eine Lebensdauer von Tagen bis Wochen. Je nach Typ wirken sie abkühlend (zum Beispiel sulfathaltige Aerosole) oder erwärmend (zum Beispiel Ruß). Insgesamt sind ihre Beiträge zur Klimaänderung jedoch gering. Die so in

die Atmosphäre eingebrachten Aerosole können sich jedoch in der Atmosphäre zu Wolkenkondensationskernen weiterentwickeln. Damit beeinflussen sie dann „natürliche“ Wolken. Wenn mehr Kondensationskerne vorhanden sind, gibt es mehr Wolkenröpfchen und -kristalle, die jedoch kleiner sind. Damit werden Wolken langlebiger und reflektieren mehr Sonneneinstrahlung. Zudem können Kondensationskerne weit transportiert werden und erst dann die Bildung neuer Wolken ermöglichen, sobald die passenden Hintergrundbedingungen vorliegen.

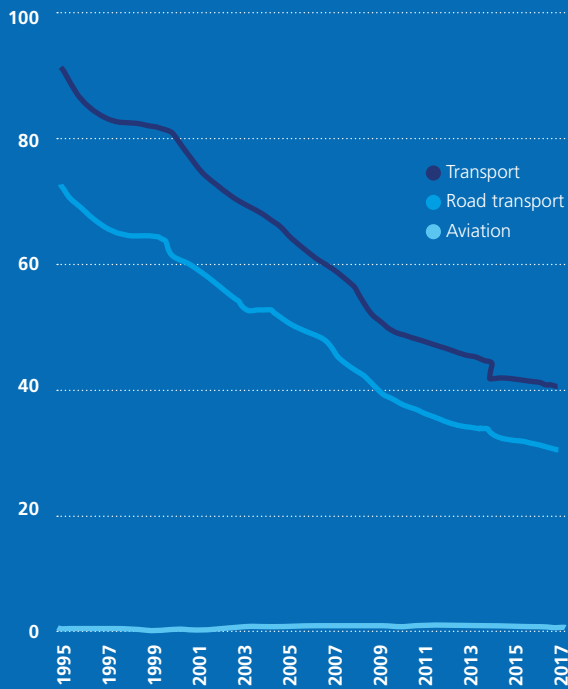
Hinsichtlich der Wirkung der Kondensationskerne aus dem Luftverkehr gibt es nur erste Abschätzungen. Vermutlich modifizieren die abgesunkenen Kondensationskerne niedrige (warme) Wasserwolken so, dass ein abkühlender Effekt entsteht. Wegen der ungenauen Kenntnis der Prozesse, die die Aerosole durchlaufen, sind die Abschätzungen des dazu gehörenden Strahlungsantriebs bestenfalls auf einen Faktor zehn bekannt. Für höher liegende Eiswolken lassen sich noch keine belastbaren Aussagen treffen. Deshalb werden derzeit die indirekten Aerosoleffekte des Luftverkehrs bei der Gesamtbewertung seiner Klimawirkung in der Regel nicht berücksichtigt. Daher sind bessere Messungen und Modelle dieser Effekte nötig.

## 2.2. LUFT- UND BODENREINHALTUNG SOWIE UMWELTASPEKTE

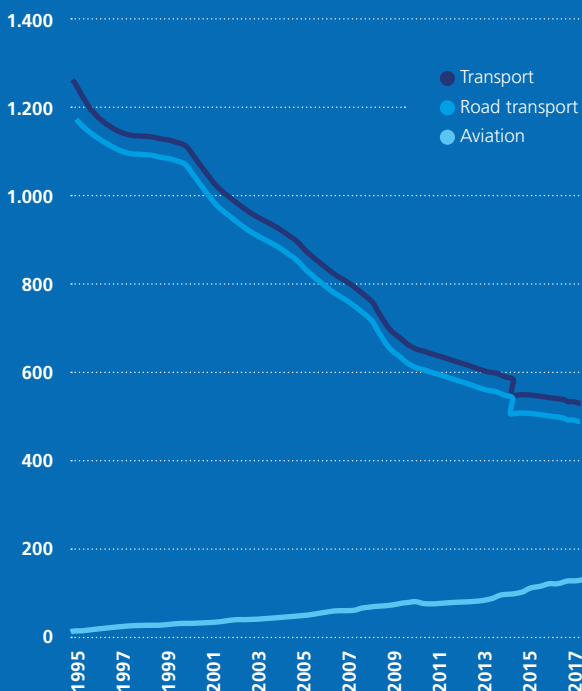
Neben den Wirkungen auf das Klima hat der Flugverkehr auch einen Einfluss auf die lokale Luftqualität an Flughäfen und deren Umgebung. Hierbei liegen besonders die ultra-feinen Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 100 nm, die auch im Straßenverkehr eine

## EMISSIONSENTWICKLUNG 1990 – 2017 FÜR KLASSISCHE LUFT- SCHADSTOFFE

Emission trends for Germany since 1995, PM10 in kt



Emission trends for Germany since 1995, NO<sub>x</sub> in kt



Rolle spielen, im Fokus der Betrachtung. Das liegt insbesondere an den erwarteten toxikologischen Eigenschaften der freigesetzten Partikel. Es gibt zwar diesbezüglich noch keine abschließende Bewertung, allerdings sind die von Flugzeugtriebwerken und Auxiliary Power Units (APUs) emittierten Partikel aufgrund ihrer Größe von weniger als 30 nm in der Lage bis tief in die menschliche Lunge einzudringen. Zudem sind die ultra-feinen Partikel im regulären Umweltmonitoring noch nicht erfasst und es existieren noch keine verbindlichen Messstandards.

Aufgrund der Emissionszertifizierung von Triebwerken – seit Kurzem auch in Hinblick auf ultra-feine Partikel-Emissionen – ist zwar davon auszugehen, dass sich die Datenlage für zukünftige Umwelt- und Ausbreitungsmodellierungen an Flughäfen verbessern wird, allerdings werden diese Partikel in Umwelt- und in Zertifizierungsmessungen unterschiedlich betrachtet. Während in der Umweltanalytik stets die Gesamtheit aller luftgetragenen Partikel erfasst wird, fokussieren zertifizierende Prüfstandsmessungen auf die Fraktion der nicht-verdampfbaren Partikel. Diese Fraktion der Partikel kann nachweisbar in erheblichem Maße direkt durch moderne Triebwerkstechnologien und alternative Kraftstoffe verringert werden. Sekundäre Partikel, die sich erst im alternden Abgas bilden, zum Beispiel aus den emittierten Schwefel- und Stickstoffverbindungen, werden allerdings ebenfalls in hohen Konzentrationen beobachtet. Zu ihrer Reduktion sind hauptsächlich schwefelarme oder schwefelfreie Kraftstoffe vielversprechend, um die lokale Luftqualität an Flughäfen zu verbessern. Im Vergleich mit anderen Quellen von Feinstaub bildet die Luftfahrt hier natürlich auch nur einen geringeren Anteil der Emissionen von etwa 1 % ab.

Derzeit werden die Grenzwerte für Stickoxide in Flughafennähe noch nicht überschritten. Fließen jedoch künftig auch Grenz- und Richtwerte von ultra-feinen Partikeln in die Schadstoffbewertung ein oder werden die Grenzwerte weiter limitiert, ist die Gefahr einer Überschreitung gegeben. Daher sollte sowohl hinsichtlich Messstandards als auch weiterer Emissionsreduktion proaktiv gehandelt werden.

.....

*„Falls alle Potenziale genutzt werden, rückt eine klimaneutrale Luftfahrt in erreichbare Nähe.“*

.....

## 2.3. LÄRM

Die Schallabstrahlung heutiger Verkehrsflugzeuge wird maßgeblich beim Start durch die Turbofan- und Turboprop-Antriebe, beim Landen zusätzlich durch Strömungsgeräusche am Flugzeug wie zum Beispiel Klappen und das Fahrwerk bestimmt. Zusätzlich entstehen Schallquellen durch aerodynamische Wechselwirkung von Komponenten. Ein eher untergeordneter Anteil des Flugzeuggeräuschs rührt aus dem Kerntriebwerk, das mittels Gasturbine die Leistung für den eigentlichen Antrieb bereitstellt. Die Wahrnehmung dieses Fluglärms wird neben seinem reinen Schallpegel maßgeblich durch weitere

Eigenschaften wie das Frequenzspektrum und dessen zeitlichen Verlauf beeinflusst. So ist ein isolierter Ton wesentlich störender als ein gleichmäßiges Rauschen. Dasselbe gilt für sich stark ändernde Lärmpegel. Der Fluglärm führt insgesamt dazu, dass die Akzeptanz der Anwohner von Flughäfen für den dort stattfindenden Luftverkehr sinkt und operative Beschränkungen wie Nachtflugverbote eingeführt wurden. Mögliche Maßnahmen zur Lärmreduktion sind eine niedrigere fan-tip-Geschwindigkeit, Abschirmung oder verteilte Antriebe.

## AKTUELLER HANDLUNGSBEDARF

Auf der Pariser Klimaschutzkonferenz im Dezember 2015 haben sich 195 Länder erstmalig auf ein rechtsverbindliches, weltweites Klimaschutzübereinkommen geeinigt. Die Staaten verständigten sich darauf, durch eine wesentliche Emissionsminderung die globale Durchschnittstemperatur auf den Anstieg von unter 2 °C zu begrenzen, um die Folgen des Klimawandels deutlich zu reduzieren. Wie beschrieben, haben durch die Luftfahrt verursachte Emissionen in mehreren Hinsichten eine schädliche Wirkung und müssen daher zwingend reduziert werden. Dabei reicht eine reine Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht aus. Beispiele wie die Weltumrundung durch das Solarflugzeug SolarImpulse oder erste elektrische Flugzeug-Produkte in Nischen wie Trainingsflugzeuge zeigen, dass komplett emissionsfreie Luftfahrzeuge prinzipiell möglich sind. Für größere Flugzeuge ist eine emissionsfreie oder auch nur emissionsneutrale Lösung extrem schwer zu realisieren, solange Kohlenwasserstoffe für die Energiegewinnung eingesetzt werden, da diese immer CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O erzeugen. Falls jedoch alle Potenziale genutzt werden, rückt eine klimaneutrale Luftfahrt in erreichbare Nähe, bei der Emissionen weitgehend reduziert und durch klimaoptimierte Flugführung deren Wirkung in der Atmosphäre stark verringert werden.

In Verbindung mit dem steigenden Wachstum des Luftverkehrs wird die zentrale Herausforderung sein, das Wachstum von seinen Folgen für Mensch und Umwelt zu entkoppeln. Dieses Ziel verfolgt eine Forschungspolitik der geringsten Umweltbelastung – „least impact aviation“. Die Luftfahrtforschung untersucht vielversprechende technologische und operationelle Möglichkeiten für diesen Ansatz, die im Folgenden dargestellt und erläutert werden. Neben verbrennungsbasierten Konzepten wie alternativen Kraftstoffen und Wasserstoff in Verbindung mit neuen Gasturbinenkonzepten liegt der Fokus auf (hybrid-) elektrischen Antrieben, der Erforschung und dem Einsatz schallreduzierender Materialien und Strukturen im Luftfahrtbereich sowie auf den Anforderungen an eine zukünftige Infrastruktur. Außerdem werden innovative Konzepte der Flugführung betrachtet. Alle Aspekte wirken sich auf die Flugzeugebene aus und bringen unterschiedliche Anforderungen an die Konfiguration eines Flugzeugs mit sich.



# VERBRENNUNGS- BASIERTE KONZEPTE

3





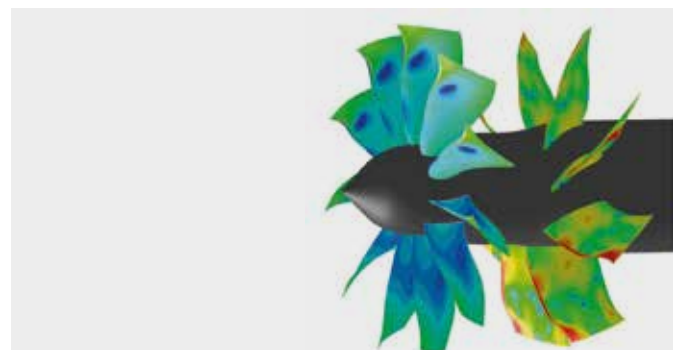
Derzeitige Flugzeugantriebe für die kommerzielle Luftfahrt basieren fast ausschließlich auf der Verbrennung von Kerosin in Gasturbinen. Dieses Prinzip bewährt sich aufgrund seiner hohen spezifischen Leistung, wegen seiner hohen Effizienz und aufgrund seiner kompakten und leichten Bauweise. Allerdings werden immer Kraftstoffe verbrannt und damit oben beschriebene Emissionen ausgestoßen. Mögliche Wege, diese Emissionen zu reduzieren, sind eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrades von Gasturbinen, die Einführung von neuen Gasturbinenkreisprozessen mit verminderter Schadstoffemission und Klimawirkung sowie der Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe wie synthetisches Kerosin oder Wasserstoff.

### 3.1. WIRKUNGSGRADOPTIMIERUNG VON KLAS- SISCHEN GASTURBINEN-ANTRIEBEN

Mit der Einführung der ersten Strahltriebwerke auf Basis von Gasturbinen in der kommerziellen Luftfahrt in den 1960er Jahren hat sich der Luftverkehr zu einem Massenverkehrsmittel mit mehr als 4 Mrd. Passagieren im Jahr 2017 entwickelt. Seitdem konnte der spezifische Verbrauch der Gasturbine nahezu halbiert werden.

Erreicht wurde dies vor allem durch höhere Nebenstromverhältnisse (von ~ 1 bis heute 12), die den Vortriebswirkungsgrad verbessern, durch höhere Gesamtdruckverhältnisse (von ~ 15 bis heute 50) und Turbineneintrittstemperaturen, die den thermischen Wirkungsgrad steigern. Weitere Verbesserungen wurden erzielt durch erhöhte Wirkungsgrade aller Komponenten, Optimierung der Installation oder den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen.

Die wichtigste Neuentwicklung der letzten Jahrzehnte im Bereich der Flugantriebe ist das Getriebefan-Triebwerk, das Pratt & Whitney zusammen mit MTU entwickelt hat. Im Gegensatz zum konventionellen Turbofan, bei dem Fan und Niederdruckturbinen auf einer Welle mit



Das virtuelle Triebwerk ermöglicht eine hochakkurate Designfähigkeit

gleicher Drehzahl laufen, sind beim Getriebefan beide Komponenten durch ein Getriebe miteinander verbunden. Damit kann der große Fan langsamer und die Niederdruckturbinen schneller drehen. Das ermöglicht hohe Nebenstromverhältnisse ( $> 12$ ) für hohen Vortriebswirkungsgrad und verbessert die Wirkungsgrade von Fan und Niederdruckturbinen, sodass der Kraftstoffverbrauch und damit der Kohlendioxid- und Lärmemissionen deutlich sinken. Außerdem wird der Antrieb leichter, da weniger Stufen in der Niederdruckturbinen und im Niederdruckverdichter benötigt werden. Aktuelle Studien zeigen, dass auf Basis des Getriebefan-Triebwerks weitere Verbesserungen möglich sind. So soll der Vortriebswirkungsgrad durch höhere Nebenstromverhältnisse (bis zu 20) weiter verbessert werden und der thermische Wirkungsgrad durch höhere Temperaturen und Druckverhältnisse (bis zu 70). Die Ergebnisse der aktuell abgeschlossenen EU-Technologieprogramme des 7. Rahmenprogramms zeigen, dass Weiterentwicklungen des Getriebefan-Triebwerks den Kraftstoffverbrauch um 25 %–36 % je nach Anwendung gegenüber einem Triebwerk aus dem Jahr 2000 reduzieren können.

Das Getriebefan-Triebwerk wird daher für die nächsten Jahrzehnte den Standardantrieb in der kommerziellen Luftfahrt bilden. Aktuell werden die notwendigen Technologien wie integrierte Verdichtungs- und Expansionsysteme oder Hochtemperatur-Leichtbauwerkstoffe für die nächste Generation des Getriebefan-Triebwerks erarbeitet. Konzepte wie Blisks und Leichtbau Fans (CFK-Fan) und Produktionsverfahren wie 3D-Druck bieten weiteres Optimierungspotenzial.

Hier zeigt sich, dass das Potenzial zur Schaffung emissionsreduzierender Strukturen bei weitem nicht ausgeschöpft ist. Durch die Integration diverser Funktionen in die Struktur entstehen erhebliche Leichtbaupotenziale und Möglichkeiten Gewicht und Produktionskosten zu reduzieren, da durch integrale, multifunktionelle Strukturen Prozess-

schritte und die Anzahl der Bauteile optimiert werden können. Unterstützt wird dies durch die digitale Abbildung der Struktur (Digitaler Zwilling).

### 3.2. WIRKUNGSGRADOPTIMIERUNG DURCH NEUE THERMISCHE TURBOMASCHINEN

Eine weitere Steigerung von Gesamtdruckverhältnis und Turbineneintrittstemperatur stößt zunehmend an Grenzen. Höhere Temperaturen sind durch die zulässigen Materialtemperaturen begrenzt, die auch nicht durch größere Kühlluftmengen kompensiert werden können, und höhere Druckverhältnisse führen in den letzten Verdichterstufen zu sehr kleinen Schaufelhöhen und damit zu schlechten Wirkungsgraden.

In verschiedenen nationalen und europäischen Forschungsprogrammen werden deshalb Optionen für die Überwindung dieser Grenzen untersucht. Folgende Ideen erscheinen vielversprechend:

- Die Kühlung der verdichteten Luft zwischen Niederdruck- und Hochdruckverdichter durch einen Zwischenkühler verbessert zusammen mit höheren Gesamtdruckverhältnissen den thermischen Wirkungsgrad.
- Einen Schritt weiter geht die Gasturbine mit Zwischenkühler und Abgaswärmetauscher. Hier wird die Energie, die mit dem Abgas der Turbinen an die Umgebung abgeführt wird, mittels eines Abgaswärmetauschers zur Erwärmung der verdichteten Luft zwischen Verdichteraustritt und Brennkammereintritt genutzt. Damit reduziert sich die notwendige Brennstoffzufuhr in der Brennkammer und der thermische Wirkungsgrad steigt an.

.....

*„Das DLR wies nach, dass alternative Kraftstoffe die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 40 % und die Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 70 % reduzieren können.“*

.....

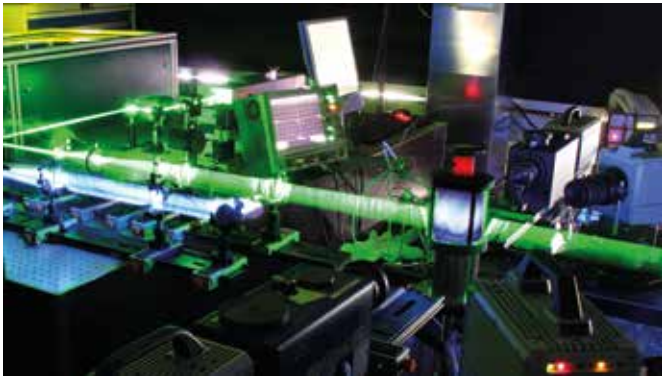
- Ebenfalls die Energie im Abgas nutzen sogenannte Bottoming-Prozesse, die die Abgasenergie der primären Gasturbine einer zusätzlichen Wärmekraftmaschine wie einem Dampfkraftprozess zuführen, der zusätzliche Leistung erzeugt. Stationäre Gasturbinen erreichen mit diesem Prinzip extrem hohe Wirkungsgrade, sind aber in der Luftfahrt wegen des großen Bauraums nicht einsetzbar. Eine mögliche Abwandlung wäre der „Water Enhanced Turbofan (WET)“ Prozess, der von MTU entwickelt wird. Er nutzt die Turbine des Gasturbinenprozesses auch für den Dampfkraftprozess, indem Dampf in die Brennkammer der Gasturbine eingespritzt wird. Das benötigte Wasser wird dabei direkt aus dem Abgas der Turbine abgeschieden. Durch die nasse Verbrennung wird zusätzlich die Emission von NO<sub>x</sub> gesenkt und die Bildung von Kondensstreifen wird wahrscheinlich durch die Kondensation des Wassers im Abgas stark vermindert. Die größte Herausforderung für dieses Antriebskonzept liegt im Design von im Flugzeug integrierbaren Kondensatoren und Dampferzeugern.
- Zur weiteren Drucksteigerung bieten sich verschiedene Wege an wie der Einsatz eines Kolbenmotors, die „Pulse Detonation“ (explosionsartige Verbrennung mit Druckerhöhung) oder das Prinzip des „Wave Rotors“ (Druckerhöhung durch Druckwellen). So könnte die Verbrennung in einen Freikolbenmotor ausgelagert werden, der über einen Freikolbenverdichter den Druck erhöht. Da die Verbrennung hier nicht kontinuierlich abläuft, sind die gesteigerten Drücke und Temperaturen für das Material akzeptabel. Die größte Herausforderung sind dabei die gesteigerten NO<sub>x</sub>-Emissionen aufgrund der hohen Temperaturen und die Kopplung des kontinuierlichen Turbinenprozesses mit dem diskontinuierlichen Kolbenprozess.
- Ein vielversprechender Kandidat im Bereich der Brennkammern ist der FLOX-Brenner für Gasturbinen. Obwohl dieser ursprünglich für Industriezwecke entwickelt wurde, wird er gegenwärtig vom DLR zusammen mit Industriepartnern für die Luftfahrt adaptiert. Dabei

werden Brennstoff, Luft und Abgas stark gemischt, bevor sie in der Verbrennung eingesetzt werden, um lokale Temperaturspitzen in der Flamme und NO<sub>x</sub>-Bildung zu vermeiden. Weitere Vorteile jenseits der geringeren Emissionen sind hohe Stabilität und große Brennstoffflexibilität.

### 3.3. VERBRENUNG VON WASSERSTOFF IN DER GASTURBINE

Die Nutzung von Wasserstoff in Gasturbinen ist nicht neu und sie ist ohne grundlegende Veränderungen des Gesamtsystems möglich. Insbesondere im Bereich der stationären Gasturbinen bereiten sich die Hersteller auf eine Nutzung von Wasserstoff als Energieträger vor und planen, ihr Produktportfolio bis 2030 auch für 100 % Wasserstoff anbieten zu können.

Der größte Entwicklungsbedarf bei der Gasturbine liegt im Bereich der Brennkammer. Hier besteht die Herausforderung, den Wasserstoff sicher und mit möglichst geringen NO<sub>x</sub>-Emissionen stabil und unter den sehr weiten Betriebsbedingungen in der Fluggasturbine zu nutzen. Aufgrund eines erweiterten Stabilitätsbereichs beim Einsatz von Wasserstoff kann die Verbrennung bei mageren Bedingungen betrieben werden. Dies reduziert die Flammentemperatur und ist somit vorteilhaft hinsichtlich der thermischen NO<sub>x</sub>-Produktion, sodass mit geeigneten Brennertechnologien auch im Wasserstoffbetrieb eine sehr NO<sub>x</sub>-arme Verbrennung möglich ist. Wasserstoff ist durch seine hohe Reaktivität, aber auch durch die komplexe Druckabhängigkeit seines Zündverhaltens in herkömmlichen Verbrennungssystemen nicht ohne Weiteres nutzbar. Deshalb besteht an dieser Stelle noch erheblicher Entwicklungsbedarf im Bereich neuartiger



Wasserstoffeinspeisungs-Verbrennung am DLR in Stuttgart

Brennkammertechnologien, welche eine schadstoffarme, flashback-resistente Verbrennung von Wasserstoff ermöglichen. Mit ausreichenden Entwicklungsanstrengungen können die  $\text{NO}_x$ -Emissionen jedoch so weit abgesenkt werden, dass diese nicht mehr nachweisbar klimawirksam sind. Darüber hinaus ändert sich durch die Nutzung von Wasserstoff die Zusammensetzung des Abgases. Der höhere Anteil an Wasser führt zu anderen Wärmeübergängen an Bauteilen, somit wird eine Anpassung der Kühlungskonzepte notwendig.

Flugzeuge mit einer hohen Reichweitenforderung wie Mittel- und Langstreckenflugzeuge benötigen ein entsprechend großes Volumen zur Unterbringung des flüssigen Wasserstoffs. Hierdurch ist mit Leistungseinbußen aufgrund des größeren aerodynamischen Widerstands und der höheren Strukturmasse zu rechnen. Die Auswirkungen einer großen Menge an Wasserdampf in Verbindung mit Verbrennungsprozessen auf die Komponenten der Gasturbine sind heute noch unklar. In diesem Zusammenhang bietet es sich an, je nach Mobilitätskonzept unterschiedliche Kraftstoffkonzepte zu erarbeiten.

Je nach Kraftstoffpreisszenario und Reichweite stellen die Kraftstoffkosten  $\sim 20\text{--}50\%$  der direkten Betriebskosten dar. Die klassischen Technologieverbesserungen hinsichtlich Triebwerkeffizienz, aerodynamischer Güte und strukturellen Leichtbaus werden aufgrund der

begrenzten und teuren Produktionsmöglichkeiten von synthetischen Kraftstoffen an Bedeutung gewinnen. Deshalb ist die Auslegung eines effizienten Flugzeugs hinsichtlich Antrieb, Aerodynamik, Leichtbau und Flugregelung weiterhin von sehr großer Bedeutung. In dieser Hinsicht muss sich die traditionelle Luftfahrt transformieren, um den Herausforderungen der Luftfahrt von morgen adäquat begegnen zu können.

### 3.4. EINSATZ NACHHALTIGER KRAFTSTOFFE

Dem Energieträger kommt in der Luftfahrt eine außerordentliche Bedeutung zu, da der Energiebedarf extrem hoch, aber gleichzeitig sowohl das verfügbare Volumen als auch die mitzuführende Kraftstoffmasse limitiert sind. Zudem hat die Sicherheit oberste Priorität. Alle drei Punkte erfüllt zurzeit konventionelles Kerosin als hochspezialisiertes, sicheres und günstiges Produkt. Zudem hat der Energieträger eine große Bedeutung für die entstehenden Emissionen. Dabei muss zwischen lokalen Emissionen am Flugzeug und Emissionen über den gesamten Lebenszyklus unterschieden werden. Dies betrifft sowohl den Effekt von  $\text{CO}_2$  auf das Klima als auch die oben beschriebenen Nicht- $\text{CO}_2$ -Effekte. Um den Nutzen von nachhaltigen Kraftstoffen fundiert zu bewerten, fehlen einheitliche Nachhaltigkeitskriterien. Diese sollten beispielsweise die Systemgrenzen definieren und die Messung der verschiedenen Emissionen festlegen.

#### KOHLLENWASSERSTOFF-BASIERTE KRAFTSTOFFE

Um vorhandene Flugzeuge und Infrastruktur weiterhin nutzen zu können, wurde in der Zulassung für nachhaltige Luftfahrt-Kraftstoffe das Drop-in-Konzept eingeführt. Dabei handelt es sich um zugelassene Mischungen aus synthetischen und konventionellen Kraftstoffen. Sie können in allen Flugzeugen und Infrastrukturen ohne Einschränkung und Modifikation bereits heute exakt wie konventionelle Kraftstoffe genutzt werden. Derzeit sind bis zu 50 % Beimischung zu herkömmlichem Kerosin zugelassen. Im gesamten Lebenszyklus kann reines synthetisches Kerosin im Vergleich mit fossilem Kerosin die  $\text{CO}_2$ -Emissionen um 80 % reduzieren, falls der ökologische Fußabdruck der Herstellungsanlage selbst eingerechnet wird.

Projekte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wie zum Beispiel ECLIF (Emission and CLimate Impact of alternative Fuel) oder airegEM weisen das grundlegende Potenzial von alternativen Drop-in-Kraftstoffen Emissionen zu senken nach. So kann eine Beimischung von 50 % die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 40 % reduzieren. Zusätzlich konnten durch ein entsprechendes Design des synthetischen Kraftstoffs 50–70 % der Ruß- und Partikelemissionen vermieden werden. Durch den Einsatz von weitgehend aliphatischen Kohlewaserstoffen ist von einer zusätzlichen Reduktion auszugehen. Zusammen mit einer Optimierung des Brenners ist zudem eine vollständige Vermeidung von NO<sub>x</sub>-Emissionen zu erwarten.

Alternative Drop-in-Kraftstoffe werden bereits heute auf kommerziellen Flügen eingesetzt. Allerdings sind die Mengen aktuell noch bei unter 1 % des weltweiten Luftfahrt-Kraftstoff-Verbrauchs. In Europa wird ausschließlich in Oslo bereits alternativer Kraftstoff eingesetzt. Eine tiefgehende wissenschaftliche Begleitung über die Nutzbarkeit und die entsprechende Emissionsminderung wurde unter anderem im BMVI-Projekt DEMO-SPK (Forschungs- und Demonstrationsvorhaben zu erneuerbarem Kerosin) demonstriert.

Hindernis für eine Einführung in großen Mengen ist derzeit die Produktionskapazität und der Preis. Diese ist noch nicht in ausreichendem Maß vorhanden, da die Nachfrage und die Marktsicherheit nicht vorhanden sind. aireg – Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. zufolge geht nach Prognosen aus den USA und Asien mit einem Produktionsanstieg die Erwartung einher, dass sich der Preis für alternative Kraftstoffe bei einem Faktor 2 gegenüber fossilem Kerosin – abhängig von der Entwicklung der Rohölpreise – einpendeln wird, während er heute noch deutlich höher liegt.

Es werden derzeit Quoten für alternative Kraftstoffe diskutiert, in Norwegen zum Beispiel gilt bereits eine Quote von 0,5 %. Hierzuland

fordert aireg eine staatlich vorgeschriebene Quote für den Einsatz nachhaltiger Flugkraftstoffe einzuführen. Damit sei für die Produzenten die erforderliche Investitionssicherheit gesorgt und den Fluggesellschaften ebne sie den Weg, die ambitionierten Klimaziele bis 2050 erreichen zu können. Ein Ausbaupfad für die großskalige Erzeugung inklusive fortlaufender technologischer Verbesserung und damit verbundener Kostenreduktion ist heute noch nicht vorhanden. Er hängt wesentlich von politischen Maßnahmen zur Marktsicherheit und der Finanzierung von Produktionseinheiten und Technologieentwicklung ab.

Zudem benötigt die Herstellung Ressourcen wie Land, Wasser, erneuerbare Energien, Kohlenstoffquellen und Kapital. Insbesondere der rechnerische Bedarf an erneuerbar erzeugter elektrischer Energie übersteigt bei Weitem den derzeitigen Ausbaupfad für Deutschlands Energiewende. Die verwendete Kohlenstoffquelle beeinflusst zudem die benötigte Menge an erneuerbarer Energie. Der weitverbreitete Fischer-Tropsch-Prozess nutzt dazu vor allem industrielles Kohlenstoffmonoxid CO aus zum Beispiel Stahl- oder Zementproduktion. In Anstreben der Pariser Klimaziele fällt bei diesen Prozessen allerdings immer weniger CO an. Andere Prozesse verwenden stattdessen Altfette oder andere Biomasse und bedingen dadurch einen erhöhten Bedarf an Fläche, die nicht mehr für die Landwirtschaft zur Verfügung steht. Die direkte Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Luft im Verfahren „Direct Air Capture“ (DAC) benötigt viel zusätzliche elektrische Energie. Klar ist, dass es aus Flexibilitätsgründen einen Mix verschiedener Herstellungsverfahren mit einem breiten Rohstoff-Spektrum geben muss und wird. Projekte wie EU H2020 JETSCREEN und das US High Performance Fuels Program versuchen, diese Kosten beziehungsweise das Risiko eines Fehlschlags während der Zulassung zu reduzieren.

Die Wirkungen von Drop-in-Kraftstoffen können letztlich direkt durch höhere Beimischungsraten von mehr als 50 % maximiert wer-



Im Projekt ECLIF untersuchten DLR und NASA die Wirkung von alternativen Kraftstoffen auf die Umwelt



den. Ideal für eine minimierte Klimawirkung sind sogenannte aromatenfreie Near-Drop-in-Kraftstoffe. Diese unterscheiden sich von Drop-in-Kraftstoffen, indem sie möglicherweise kleine Änderungen an Flugzeugen, Infrastruktur oder Betrieb (zum Beispiel Einsatz nur in geeigneten Flugzeugen) erfordern. Sie bieten aber ein größeres Optimierungspotenzial und damit Emissionsreduktionspotenzial. Derzeit gibt es keine Zulassung für solche Kraftstoffe. Near-Drop-in-Kraftstoffe sind ein Forschungsziel im DLR-Querschnittsprojekt Future Fuels. Durch Co-Optimierung von Kraftstoff und Brenner lassen sich hierbei die CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 80 %, die Ruß- und Partikelemissionen um bis zu 90 % und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um beinahe 100 % reduzieren. Boeing erbrachte dazu bereits im März 2017 den Nachweis, dass 100 % aromatenfreie Kraftstoffe aus Biomasse in einer Boeing 777F einsetzbar sind. Nachhaltiges synthetisches Kerosin kann dabei poten-

ziell klimaneutral mit definierten Eigenschaften, wie Dichte und Energiedichte, hergestellt werden. Wegen seiner Ähnlichkeit zu fossilen Kraftstoffen hat dieser Energieträger daher keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Gesamtflugzeugkonfiguration. Heute ist allerdings die Verfügbarkeit des Energieträgers in großen Mengen noch eine Herausforderung.

#### EINSATZ VON WASSERSTOFF ALS NACHHALTIGEM KRAFTSTOFF

Die Nutzung von Wasserstoff in der Gasturbine vereint gleich mehrere Vorteile. So können dadurch die lokalen Emissionen von CO<sub>2</sub>, Ruß und Aerosolvorläufern auf null reduziert werden. Zudem kann Wasserstoff durch Elektrolyse mit regenerativ erzeugtem Strom bereits jetzt CO<sub>2</sub>-neutral erzeugt werden. Verfahren wie die Alkalielektrolyse stehen als ausgereifte Technologie in großtechnischem Maßstab zur Verfügung. Daneben bieten Verfahren wie die Festoxid-Elektrolysezelle (SOEC) noch ein erhebliches Potenzial für die Zukunft.

Zur Bewertung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im gesamten Lebenszyklus wurde im Projekt CRYOPLANE2 eine komplette Lebenszyklus-Analyse für unterschiedliche Brennstoffe in einem Flugzeug der Größe eines Airbus A319 durchgeführt. Im Ergebnis zeigte die Verwendung von Wasserstoff eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von über 90 %, wenn er aus erneuerbaren Energien hergestellt ist.

Zur Erreichung von CO<sub>2</sub>-Minderung ist es nur sinnvoll Wasserstoff einzusetzen, der aus regenerativen Quellen wie zum Beispiel Elektrolyse oder Biomasse erzeugt wurde, sogenannter Grüner Wasserstoff. Laut eines IEA-Berichtes (2019) wird derzeit der überwiegende Anteil des weltweit jährlich produzierten Wasserstoffs (rund 75 %) von etwa 70 Mio. Tonnen noch als sogenannter Grauer Wasserstoff aus Erdgas erzeugt. Obwohl diese Verfahren fossile Energieträger verwenden, bieten sie bereits heute die Möglichkeit das CO<sub>2</sub> am Ort der Wasserstofferzeugung abzuscheiden und zu speichern. Damit wäre schon heute eine CO<sub>2</sub>-neutrale Nutzung von Wasserstoff realisierbar.

Es wurden mittlerweile einige Verfahren zur Wasserstoff-Herstellung bis zur Serienreife entwickelt wie:

- Dampfreformer (Erdgas)
- Partielle Oxidation (Ölvergasung)
- Autotherme Reformer (Methanolreformierung)
- Kvaerner-Verfahren
- Elektrolyse von Wasser
- Biomasse (Vergasung, Vergärung)
- Wasserstoff aus Grünalgen



Messungen der Abgase am Boden und der Kontrollstand für die Messungen auf dem Vorfeld des Flughafens Ramstein

.....

*„Ziel ist es, heutiges Kerosin durch 100 % nachhaltige Kraftstoffe wie grünen Wasserstoff zu ersetzen.“*

.....

Soll Wasserstoff im Sinne einer Wasserstoffenergiewirtschaft im großen Maße zur Energieerzeugung beziehungsweise -speicherung eingesetzt werden, ist eine Herstellung aus fossilen Rohstoffen nicht mehr sinnvoll. Die ersten vier Verfahren der oben aufgeführten Auflistung nutzen grundsätzlich fossile Rohstoffe.

Zur Speicherung von Wasserstoff an Bord des Flugzeugs bestehen verschiedene Möglichkeiten: Eine Speicherung als komprimiertes Gas erfordert Drucktanks und weist derzeit gravimetrische Speicherdichten von < 5 % auf, die nur für kleine Energiemengen und damit auch nur für kleine Fluggeräte geeignet sind. In der kommerziellen Luftfahrt kann derzeit das bestmögliche Tankvolumen und -gewicht (gravimetrische Speicherdichte > 5 %) nur mit Wasserstoff in verflüssigter Form erreicht werden. Daher muss der Tank (-252 °C) isoliert

werden. Dies erfordert jedoch eine neue Flugzeugarchitektur. Das große benötigte Volumen zur Unterbringung des Wasserstoffs muss konfigurativ berücksichtigt werden. Die umspülte Oberfläche des Gesamtflugzeugs nimmt dadurch zu, sodass der aerodynamische Widerstand ansteigt und die aerodynamische Effizienz verringert wird. Die Betriebsleermasse ist zudem durch Wasserstofftanks stark beeinflusst, sodass die Flugleistungen auch hiervon abhängig sind. Für eine Maximierung der Flugleistungen ist radikaler Systemleichtbau notwendig und sind Möglichkeiten zu untersuchen, Tanks als mittragende Struktur auszuführen. Aufgrund der hohen Betriebsleermasse ist der Wirkungsgrad besonders wichtig. Welche Auswirkungen der Einsatz von Wasserstoff auf das Flugzeugdesign mit sich bringt, wird in Kapitel 6 betrachtet, die Anforderungen an eine Infrastruktur sind in Kapitel 5.3 aufgeführt.

## AKTUELLER HANDLUNGSBEDARF

Um das Ziel, Kerosin durch 100 % nachhaltige Kraftstoffe zu ersetzen, ergibt sich folgender Forschungsbedarf:

- Weiterentwicklung von Gasturbinen.
- Technologieentwicklung für neue thermische Turbomaschinen.
- Zuverlässige Methoden zur Kraftstoffbewertung und zum Flugzeugkomponentendesign sind erforderlich. Weitergehende Forschungsvorhaben zur genauen umfassenden Identifikation der Zusammenhänge zwischen Kraftstoffzusammensetzung und Flugzeug sind nötig.
- Die Entwicklung kraftstoffsensitiver Methoden für das Design von kraftstoffoptimierten Flugzeugkomponenten, wie zum Beispiel Brennkammern, ist notwendig.
- Kraftstoffauswirkungen sind sehr komplex und betreffen verschiedene fachliche Disziplinen und Industriezweige. Für die umfassende Bewertung und Optimierung der Kraftstoff-Flugzeugsysteme ist die Entwicklung einer digitalen Plattform zur interdisziplinären Zusammenarbeit notwendig.
- Die potenzielle Einführung einer neuen Klasse von Kraftstoffen hat vielfältige Auswirkungen weltweit. Für die Implementierung von Near-Drop-in-Kraftstoffen muss eine mit den Stakeholdern abgesprochene Handlungsstrategie entworfen und umgesetzt werden.
- Die Klimawirkungsvorteile von Wasserstoff sind stark vom Herstellungspfad abhängig. Die globale Wasserstoffnachfrage wird derzeit vorrangig aus fossilen Rohstoffen hergestellt. Daher müssen saubere Herstellungspfade weiterentwickelt und gefördert werden.
- Die Eigenschaften von Kondensstreifen-Zirren, die durch die Nutzung von Wasserstoff in Gasturbinen entstehen, müssen verlässlich bestimmt werden, unter anderem die Größe der entstehenden Eispartikel (beeinflusst die Lebensdauer der Kondensstreifen-Zirren) sowie die optische Eigenschaft (beeinflusst die Strahlungswirkung). Die Wirkung kann durch geeignete Flugführung reduziert werden.
- Die Wasserstoff-Verbrennung verlangt Modifikationen auf Flugzeug- und Triebwerksebene, da die Tanks gut isoliert werden müssen. Tankvolumen und -gewicht machen Systemleichtbau erforderlich. Solche Aspekte müssen im Zusammenhang betrachtet werden, um ein optimales Design zu entwickeln.
- Ausdifferenzierung neuer bedarfsgerechter Mobilitätskonzepte und der damit einhergehenden klimafreundlichen Luftfahrtstrukturen, Antriebskonzepte und Kraftstofflösungen.

# ELEKTRISCHES FLIEGEN





.....

Insbesondere die Forderungen nach Mobilität und Nachhaltigkeit stellen Anforderungen an die Luftfahrtforschung, die Luftfahrtindustrie und das Lufttransportsystem, die mit konventionellen Ansätzen nicht vollständig erfüllt werden können. Andere Mobilitätsbereiche realisieren einen nachhaltigen Verkehr vor allem durch Elektrifizierung. Elektrische Antriebe stellen auch in der Luftfahrt einen vielversprechenden Ansatz dar, die steigenden Mobilitätsanforderungen mit minimaler Klimawirkung zu erfüllen, allerdings stehen dem Herausforderungen gegenüber, die größere Technologieentwicklungen in vielfältigen Bereichen notwendig machen.

.....



Für einen umweltverträglichen Luftverkehr von morgen sind mittelfristig neue Flugzeugkonfigurationen gefragt, die mit deutlich geringeren Emissions- und Lärmbelastungen kommerziell erfolgreich betrieben werden können. Elektrische oder hybrid-elektrische Antriebe haben das Potenzial, diese Anforderungen zu erfüllen.

Der elektrische Antrieb wird intuitiv mit einer Reihe von Vorteilen verbunden. Alle diese Vorteile sind konzeptionell auch vorhanden, müssen aber wegen des geringen Reifegrades der Technologie detailliert erforscht und untersucht werden, um zuverlässige Aussagen machen zu können. Die Luftfahrtindustrie steht bei der Elektrifizierung des Antriebs vor deutlich größeren Herausforderungen als der bodengebundene Verkehr, da insbesondere die Anforderungen an Leistungsgewicht des Antriebs und Energiedichte des Energieträgers um ein Vielfaches größer sind. Die Bewertung der Vor- und Nachteile ist zudem abhängig von der Wahl der Antriebsarchitektur. Die wesentlichen Unterschiede treten auf zwischen

- Batterie-elektrischen Antrieben, die ausschließlich Batterien zur Energieversorgung nutzen
- Turbo-hybrid-elektrischen Antrieben, die zusätzlich einen Gasturbinen-Generator für die Grundversorgung nutzen
- Brennstoffzellen-(hybrid)-elektrischen Antrieben, die eine Wasserstoffbrennstoffzelle gegebenenfalls mit zusätzlichen Batterien zur Stromerzeugung nutzen

Aufgrund der nachfolgend beschriebenen Vorteile und Herausforderungen wird die Umstellung auf einen elektrischen Antrieb in der Luftfahrt zwar wesentlich zum umweltfreundlichen Luftverkehr beitragen. Die Transformation wird aber ein langsamer und kostspieliger Prozess, der vielfältige Investitionen in Entwicklung, Zulassung und Infrastruktur benötigt. Der Erfolg einer solchen Umstellung könnte daher in starkem Maße von politischen Entscheidungen abhängig sein.

Eine Elektrifizierung des Antriebssystems erfordert eine Vielzahl an elektrischen Komponenten, die zusätzlich in den Antriebsstrang integriert werden müssen, was bedeutet, dass sich die Struktur grundlegend ändern muss. Eine Ausnahme bildet das batterie-elektrische Konzept, wobei man sich auch hier abseits der traditionellen Konzepte hin zu funktionsintegrierten Strukturen und den damit verbundenen Leichtbaupotenzialen bewegen kann. Jedoch sind durch die Energie- und Leistungsanforderungen im zivilen Luftverkehr die Einsatzmöglichkeiten auf absehbare Zeit sehr beschränkt.

Neben Wirkungsgradverlusten in der Energiewandlung und Übertragung, denen man mit Konzepten zum nachhaltigen Energiemanagement begegnen kann, sind bei elektrischen Antriebssystemen auch die zusätzlichen Gewichte zu berücksichtigen, unter anderem durch die zusätzlichen Massen der Kabel, Leistungselektronik und Pufferbatterien, die alle das Potenzial haben in die Struktur als solche integriert werden zu können. Die effiziente Nutzung der installierten Leistung ist daher im elektrischen Flugzeug von höchster Bedeutung. Zudem stellt das Wärmemanagement eine Herausforderung dar. Bei dem Energiemanagement und bei der Bereitstellung der elektrischen Energie fällt Wärme im Bereich von maximal 120 °C an, diese muss aus dem Flugzeug bei jeglicher klimatischer Umgebung und in allen Flugsituationen abgegeben werden können. Somit sind die Leistungs- und Energieanforderungen in allen hybrid-elektrischen Antriebssystemen zunächst höher als in konventionellen Architekturen. Folglich sind hier die konkreten Anforderungen an die Gasturbine und die Antriebsintegration sowie deren Anbindung an das gesamte Strukturkonzept des Flugzeugs entscheidend – ebenso wie ein Systemleichtbau, der elektrische Kabel und Batterien lasttragend integriert und ein effizientes Thermalmanagement unterstützt.

Welche Potenziale sich im Betriebsverhalten der Gasturbine realisieren lassen, ist Gegenstand aktueller Forschungen. Hierbei werden neben einem effizienteren Betrieb in bestimmten Flugphasen auch eine Erweiterung des stabilen Betriebsbereichs und ein agileres Betriebsverhalten untersucht. Eine wesentliche Herausforderung liegt in

## VOR- UND NACHTEILE ELEKTRISCH ANGETRIEBENER FLUGZEUGE IM PERSONEN- UND FRACHTTRANSPORT. (Die Tabelle berücksichtigt keine kleineren unbemannten Fluggeräte.)

	Vorteile	Nachteile	Beste(r) Anwendungsfall
<b>Batterie-elektrische Antriebe</b>	Hohe Leistungsdichte der Batterien erlaubt Vertikalstart  Lokal emissionsfreier Antrieb	Geringe Energiedichte der Batterien führt zu geringer Reichweite	Kurze Strecken < 300 km kurzfristig
<b>Turbo-hybrid-elektrische Antriebe</b>	Hohe Energiedichte von Kerosin führt zu größeren Reichweiten und Passagierkapazitäten  Geringe Emissionen bei Kombination mit alternativen Kraftstoffen oder Wasserstoff	Die Turbine erzeugt derzeit noch klimawirksame Emissionen  Höheres Gewicht, Verluste durch Energiewandlung und komplexeres System ggü. konventioneller Gasturbine	Mittelstrecke kurzfristig
<b>Brennstoffzellen-hybrid-elektrische Antriebe</b>	Hohe Energiedichte von Wasserstoff führt zu größeren Reichweiten und Passagierkapazitäten  Minimale Emissionen im Flug	Gewicht der Pufferbatterien während des Reisefluges ungenutzt  Geringeres Leistungsgewicht im Vergleich zur Gasturbine  Aufwändige Kühlung	Kurzstrecke kurzfristig  Mittel- bis Langstrecke langfristig
<b>Batterie – Gasturbine als Range Extender</b>	Emissionsfreier Flug auf kurzen Strecken sowie Start/Landung am Flughafen möglich  Hohe Antriebseffizienz bei batterie-elektrischen Missionen	Zusätzliches Gewicht  Höherer Kraftstoffverbrauch bei großen Reichweiten	Kurzfristig Regionalflugzeug  Mittelfristig Regionalflugzeug/Kurzstreckenflugzeug bis 2.000 km

der Wechselwirkung zwischen Antriebssystem und Flugzeugzelle. Die Auslegungs- und Bewertungsfähigkeiten basieren bei hoch integrierten Antriebskonzepten auf einem kollaborativen und multidisziplinären Ansatz zwischen Flugzeug- und Antriebsentwurf.

## 4.1. BATTERIE-ELEKTRISCHE ANTRIEBSSYSTEME

Bei einem batterie-elektrischen Konzept werden die Gasturbine und das Kerosin komplett durch einen Elektromotor mit Batterie und entsprechender Leistungselektronik ersetzt. Es handelt sich also um eine ausschließlich elektrische Leistungsübertragung und eine ausschließlich elektrische Energiequelle.

Die Hauptvorteile dieser Konfiguration sind die gute Leistungsdichte der Batterie, die annähernde Höhenunabhängigkeit und ein hoher Wirkungsgrad, der etwa doppelt so hoch ist wie der einer konventionellen Turbomaschine. Das bedeutet: Batterien können viel Energie in kurzer Zeit abgeben und erzeugen dabei relativ geringe Verluste. Rein batterie-betriebene Flugzeuge eignen sich daher insbesondere für Kurz- und Senkrechtstartfähigkeit, den Einsatz an hochgelegenen Flughäfen oder hohe Fluggeschwindigkeiten in großer Höhe, zum Beispiel für VTOLs im Bereich Urban Air Mobility. Der entscheidende Nachteil ist die geringe Energiedichte der Batterie. Das bedeutet, um viel Energie zu speichern wird eine große Masse benötigt. Die maximale Speicherkapazität bezogen auf das Batteriegewicht beträgt heute 230 Wh/kg und liegt damit um etwa den Faktor 25 unter der von Kerosin mit 11.900 Wh/kg. Bereits für Regionalflugzeuge wäre eine Energiedichte von etwa 1.000 Wh/kg nötig. Batterie-betriebene Flugzeuge eignen sich daher auf absehbare Zeit nicht für energieintensive Anwendungen wie den Massentransport über weite Strecken. Sie eignen sich allerdings für Reisen innerhalb von Ballungsräumen oder Zubringerflugzeuge an Regionalflughäfen.

Rein batterie-elektrische Antriebskonzepte haben aufgrund der sehr geringen Energiedichte einen sehr hohen Leermassenanteil, sodass sowohl die Flugzeuggröße als auch die Reichweite eines voll elektrischen Fluges in absehbarer Zukunft sehr stark begrenzt sind. Hierbei können insbesondere die energetischen Reserven für Ausweichflug, Warteschleifen und Eventualitäten dimensionierend für das Gesamtflugzeug sein. Bei kurzen Reichweiten kann der energetische Anteil der Reserven sogar größer sein als der der eigentlichen Mission selbst. Dennoch können bei deutlicher Weiterentwicklung der Batteriekapazität Flugzeuge zukünftig so ausgelegt werden, dass ein signifikanter Anteil kurzer Missionen (bis ~ 800 km) voll-elektrisch mit Batterien als Energieträger betrieben werden kann.

Elektrische Motoren sind unabhängig von der Architektur der Energieversorgung auch in kleineren Einheiten noch sehr effizient und leistungsstark. Die elektrische Leistungsübertragung erleichtert somit die Umsetzung unkonventioneller Antriebsintegrationen in das Flugzeug mit dem Ziel flugzeugseitig Effizienzvorteile zu identifizieren und so im Gesamttransportsystem eine Verbesserung zu generieren. Sie eignen sich beispielsweise hervorragend für neuartige Flugzeugentwürfe, die mit Konzepten wie multifunktionalen, integrierten Strukturen, verteilten Antrieben, Grenzschichteinsaugung und dem Entfall oder der Reduktion klassischer Komponenten (HighLift-Systeme, Fahrwerkarbeiten).

Eine Antriebssystemarchitektur bestehend aus Batterie, Regler und Elektromotor hat wegen der hohen Wirkungsgrade dabei eine schwer zu übertreffende Gesamtantriebs-effizienz bei gleichzeitig geringer Systemkomplexität. Eine weitere Einschränkung der rein batterie-elektrischen Konfiguration resultiert aus der limitierten Anzahl von Ladezyklen für die Batterien. Um die Nachteile bei der großen Betriebsleermasse flugzeugseitig zu begrenzen, können Reserven, die normalerweise nicht ausgeflogen werden, aber stets mitgeführt werden müssen, in Form von flüssigen Energieträgern mitgeführt werden. Die dafür benötigte Verbrennungsmaschine sorgt allerdings für einen höheren Komplexitätsgrad und ein höheres Gewicht als im reinen batterie-elektrischen Flugzeug. Dies ist bereits eine spezielle Form von hybrid-elektrischen Flugzeugen.

Nach anfänglichen Investitionen in die Entwicklung und Umsetzung der neuen Technologien ist perspektivisch davon auszugehen, dass unter Berücksichtigung neuer Strukturkonzepte die Herstellung, Wartung und Instandhaltung der elektrischen Flugzeugkomponenten günstiger wird als bei derzeitigen Antriebskonzepten, da die elektrischen Komponenten weniger bewegte Teile beinhalten. Die geringere Komplexität des Antriebssystems beim elektrischen Fliegen birgt zusätzliches Potenzial, die Wartungskosten zu reduzieren. Es ist davon auszugehen, dass durch die Instandhaltung von elektrischen Konzepten potenziell die gesamte Wertschöpfungskette profitiert: von den Lagerkosten über die Reduktion der Bauteile bis hin zu verlängerten Wartungsintervallen. Zur Abschätzung der Instandhaltungskosten sind allerdings neue Modelle zu entwickeln, welche die neuartigen Luftfahrzeugsystemarchitekturen und -komponenten berücksichtigen.

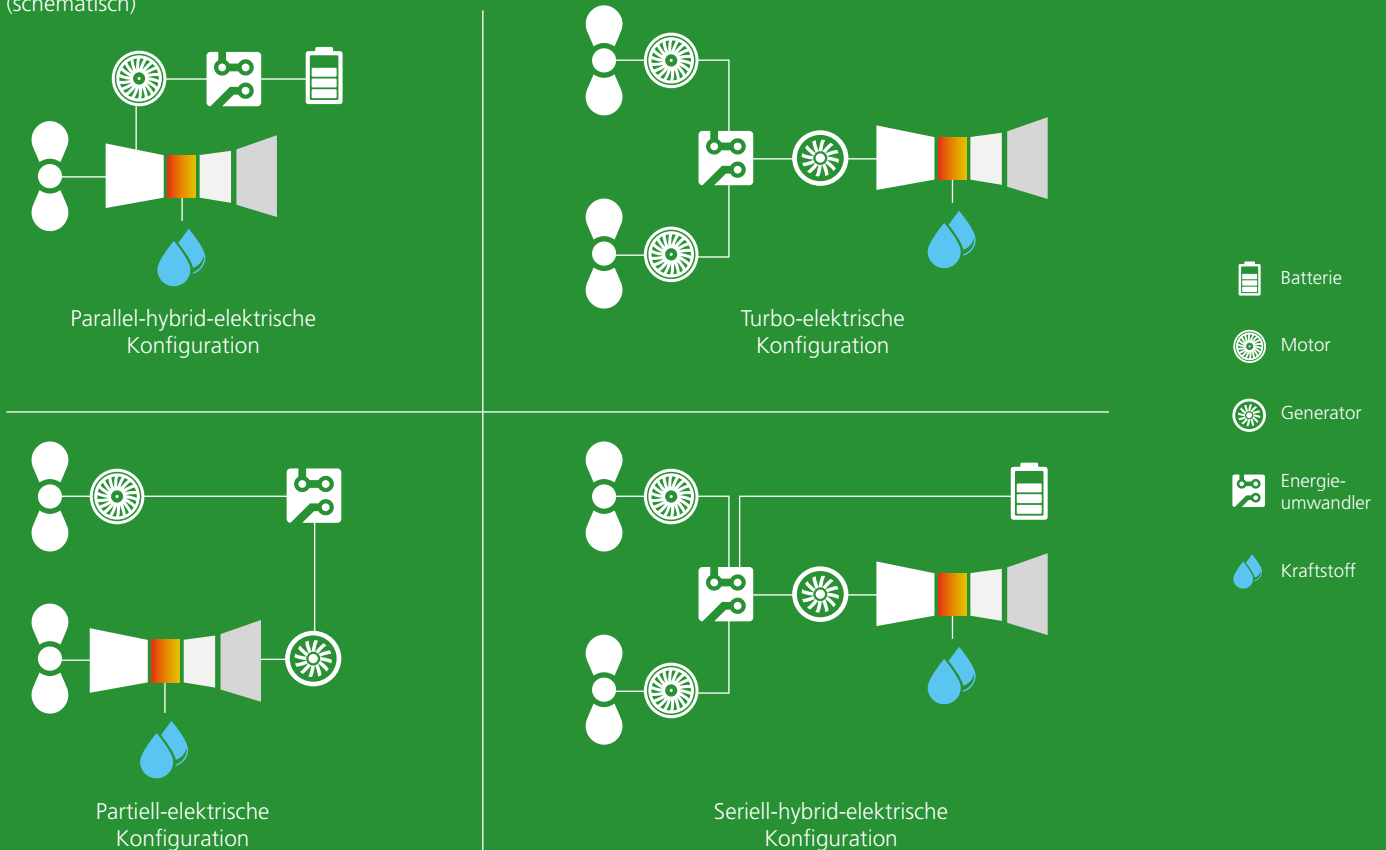
## 4.2. TURBO-HYBRID-ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Die geringe Energiedichte von Batterien kann durch turbo-hybrid-elektrische Architekturen verschiedener Ausführungen kompensiert werden, indem dem System eine Verbrennungsmaschine hinzugefügt wird. Schematisch sind die Konfigurationen in der Abbildung dargestellt. Insgesamt eröffnen turbo-hybrid-elektrische Antriebe neue Freiheitsgrade für den Flugzeug- und Antriebsentwurf. Durch die Kombination von mehreren Komponenten ergeben sich allerdings geringere Wirkungsgrade als in einer reinen Turbomaschine, ein deutlich höheres Gewicht und eine höhere Komplexität.

- Bei einer turbo-elektrischen Konfiguration wird die Leistung ausschließlich aus dem mitgeführten Kraftstoff gewonnen, der mittels Gasturbine und Generator elektrische Leistung zum Antrieb von Elektromotoren liefert
- Wird einer turbo-elektrischen Konfiguration neben Kerosin zusätzlich elektrische Energie mittels Batterie zugeführt, handelt es sich um ein hybrid-elektrisches Konzept
- Die Vortriebserzeuger wie Fan oder Propeller können allein vom Elektromotor (seriell-hybrides Konzept) oder von Elektromotor und Gasturbine zusammen angetrieben werden (parallel-hybrides Konzept)

Wird nicht der gesamte Antriebsstrang elektrifiziert, so werden die turbo-elektrischen und hybrid-elektrischen Architekturen auch als partiell-elektrisch bezeichnet. Hierbei wird lediglich ein Teil der erforderlichen Schubleistung über ein elektrisches Antriebssystem bereitgestellt und der andere Teil über ein konventionelles Triebwerk. Diese partiell-elektrischen Antriebssysteme finden sich beispielsweise bei Konzepten mit konventionellen Triebwerken, welchen zusätzliche Leistung entzogen und einem oder mehreren elektrisch angetriebenen Propulsoren zugeführt wird. Jede Architektur kann auf unterschiedliche Weisen betrieben werden. Üblicherweise wird angenommen, dass die Turbine permanent im optimalen Betriebspunkt läuft und Lastschwankungen über die Batterie abgefangen werden. Dies ermöglicht eine weitere Optimierung der Gasturbine. Alternativ ist auch denkbar, vorwiegend batterie-elektrisch zu fliegen und die Verbrennungsmaschine nur einzusetzen, wenn die Umstände es erfordern. Dies kann beispielsweise durch den Anflug eines Ausweichflughafens notwendig werden. Die Gasturbine wirkt in diesem Fall als Reserve und Reichweiten-Verlängerung und erhöht so die Flexibilität eines möglichen Flugzeugprodukts.

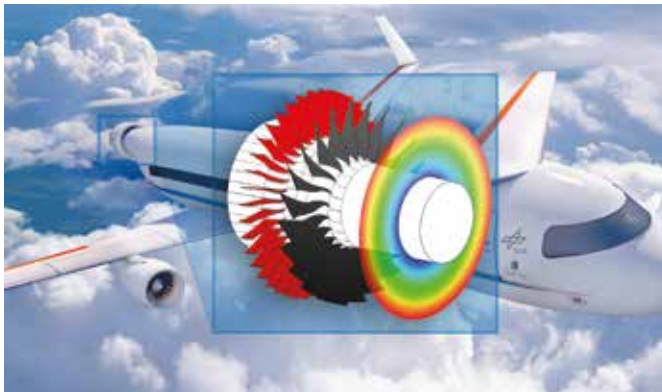
### ELEKTRISCHE ANTRIEBSARCHITEKTUREN (schematisch)



.....

*„Eine Elektrifizierung des Antriebssystems erfordert die Integration einer Vielzahl an elektrischen Komponenten, sodass sich die Struktur grundlegend ändern muss.“*

.....



Neue Triebwerkstechnologie und Antriebskonzepte: elektrisches Triebwerk eines Passagierflugzeugs

Wie oben dargestellt existieren bereits CO<sub>2</sub>-neutrale Konzepte für Verbrennungsmaschinen, die derzeit aber noch weiterhin andere schädliche Emissionen wie Ruß oder NO<sub>x</sub> emittieren.

Nichtsdestotrotz haben neue Brennkammern und Kreisprozesse in Verbindung mit alternativen Kraftstoffen das Potenzial CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und Kondensstreifen-Zirren deutlich zu reduzieren. Durch die Kombination von turbo-hybrid-elektrischen Antriebssystemen mit alternativen Kraftstoffen kann ein emissionsfreier batterie-elektrischer Betrieb am Flughafen und gleichzeitig ein mindestens CO<sub>2</sub>-neutraler Betrieb im Reiseflug erreicht werden. Auch weitere schädliche Emissionen kön-

nen wie zuvor geschildert durch eine systematische Co-Optimierung von Kraftstoffen und Brennkammer maßgeblich gesenkt werden.

Interkontinentalflüge wie mit einem Airbus A350 oder einer Boeing 777 werden mit dieser Technologie allerdings auf absehbare Zeit nicht sinnvoll sein, da das batterie-betriebene Startsystem auf der Langstrecke wegen des längeren Streckenfluges eine ungleich stärkere Auswirkung auf die Leistung des Flugzeugs hätte.

Ein wesentlicher Forschungsbedarf besteht, neben der Komponentenentwicklung, im Systemverständnis der verschiedenen hybrid-elektrischen Varianten. Dabei sind sowohl regelungstechnische Fragestellungen im Zusammenspiel der Leistungsaufteilung zwischen Batterie und Gasturbine als auch die wechselseitige Dynamik, Betriebsstrategien und mögliche Notfallmanöver relevant. Um diese Fragestellungen zu beantworten sind sowohl numerische Analysen als auch systematische experimentelle, real gekoppelte Untersuchungen auf geeigneten Prüfständen erforderlich. Auf der Komponentenseite bedürfen insbesondere Leistungs- und Energiedichten von Gasturbinen-Generatorsystemen und Batterien sowie die Entwicklung und Untersuchung von Leistungs-Management-Systemen, das Thermalmanagement und die Leistungsverteilung bei hohen Leistungen ausgiebiger Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Hohe kapazitive Speicherdichten sind auch durch geeignete Ausführungen der lasttragenden Struktur eines Flugzeugs möglich.

Grundsätzlich können alle Energieträger- und Antriebskonzepte auch in Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen sinnvoll sein,





Elektrisches Fliegen ermöglicht neue Flugzeugkonfigurationen, zum Beispiel verteilte Propeller an der Flügelvorderkante

um die jeweiligen Vorteile miteinander zu vereinen. Beispielsweise können so Reserven für ansonsten voll-elektrische Flugzeuge durch Verbrennungsmaschinen bereitgestellt werden. Außerdem könnten Lastspitzen beim Start oder beim Steigflug über Batterien gepuffert werden. So können für den effizienten Reiseflug ausgelegte Triebwerke kleiner und leichter ausgelegt werden. Neben diesen Off-Design-Hybriden kann auch eine Trennung der Energieträger und Leistungserzeuger für Antrieb und On-Board-Versorgung sinnvoll erscheinen.

Allerdings ergeben sich bei Betrachtung des gesamten Flugzeugs auch Nachteile, zum Beispiel hinsichtlich größerer Systemmassen. Deshalb ist es im Flugzeugentwurf von großer Bedeutung, die Auswirkungen einzelner Technologien im disziplin-übergreifenden Kontext zu betrachten. Die größte Einschränkung für den Betrieb von turbo-hybrid-elektrischen Flugzeugen ist die extrem niedrige Energiedichte von heutigen Batterien. Batterien heutiger Technologie sind etwa 50-mal schwerer als Kerosin. Weil aber der Wirkungsgrad von dem elektrischen System fast doppelt so hoch ist wie bei Systemen mit chemischen Energieträgern, reduziert sich der Nachteil um ca. die Hälfte. Hybrid-elektrische Konfigurationen werden daher schwerer als herkömmliche Turboflugzeuge. Durch die zusätzlichen Massen der Kabel, Leistungselektronik und Pufferbatterien ist mit einer weiteren Gewichtssteigerung zu rechnen. Dieses zusätzliche Gewicht muss durch extremen Leichtbau und Vorteile in der Flugzeugeffizienz ausgeglichen werden, um ein insgesamt effizienteres Flugzeug zu erhalten. Hier kommen wieder die Leichtbaupotenziale zum Tragen, die modulare, multifunktionale und integrierte Strukturen aufweisen können. Durch die Abbildung der Struktur im digitalen Zwilling kann unter anderem virtuell simuliert werden, welche Einflüsse Design, Auswahl von Material und

Funktion auf die komplette Wirkungsumgebung des ganzheitlichen Strukturkonzepts haben. Um eine abschließende Beurteilung zu treffen, muss daher das gesamte Flugzeug betrachtet werden. Ein weiterer Aspekt, der sich auch auf das Gesamtgewicht des Flugzeugs auswirkt, ist die Kühlung. Eine elektrische Leistungsverteilung verbindet üblicherweise immer einige zentrale Komponenten mit den Antriebseinheiten, zum Beispiel am Flügel. Konventionelle Antriebe konzentrieren hingegen die Leistungsumwandlungen auf die Antriebseinheiten am Flügel. Die Abwärme der elektrischen Systeme fällt auf niedrigen Temperaturniveaus an, die Gesamtleistung der Abwärme bewegt sich aber in ähnlichen Bereichen wie bei reinen Verbrennungsmaschinen. Dies bedeutet eine Herausforderung für das Kühlsystem, das dadurch größer und schwerer wird und damit auch die Gesamtleistung des Flugzeugs beeinträchtigt. Es muss aerodynamisch widerstandsarm in das Gesamtflugzeug integriert werden. Systemleichtbau, der die Abführung thermischer Lasten durch die Tragstruktur ermöglicht, kann das Kühlsystem unterstützen und die Gesamtleistung des Flugzeugs verbessern.

### 4.3. WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLEN-HYBRID-ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Eine Brennstoffzelle ist eine elektrochemische Zelle zur direkten Umsetzung der chemischen Energie von Wasserstoff und Sauerstoff in Elektrizität. Bisher reicht das Leistungsgewicht der Brennstoffzelle aus der Automobilindustrie mit etwa 1–2 kW/kg auf Systemebene für Luftfahrtanwendungen nicht aus, da zusätzlich noch Elektromotor und Tank zum Gesamtgewicht beitragen. Ein reines Gasturbinensystem

tem hat dagegen eine Leistungsdichte von etwa 5–15 kW/kg. Im Gegensatz zur Batterie ist die Brennstoffzelle ein Energiewandler und

die Energie selbst ist in einem Tank gespeichert, der die Reichweite bestimmt. Emissionen wie  $\text{CO}_2$ , Ruß oder  $\text{NO}_x$  fallen bei Brennstoffzellen nicht an, da die Brennstoffzelle nicht auf einem Verbrennungsprozess, sondern auf einer katalytischen Reaktion basiert. Brennstoffzellen verursachen daher mit Ausnahme von Wasser keine Emissionen und zeichnen sich zudem durch einen hohen Wirkungsgrad von etwa 50 % aus.



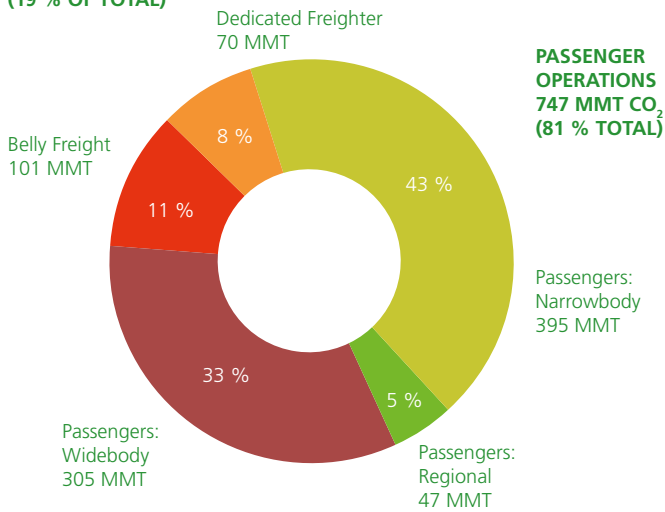
Brennstoffzellenantrieb für ein viersitziges Flugzeug

Obwohl nach wie vor großer Forschungsbedarf besteht, konnten in den letzten Jahren deutliche Fortschritte bezüglich Leistungsgewicht und Lebensdauer erzielt werden, sodass die Brennstoffzelle auch für die Luftfahrt interessant wird. Grundsätzlich existieren verschiedene Arten von Brennstoffzellen, wie beispielsweise die Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) oder die Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). In der Regel wird Wasserstoff als Kraftstoff verwendet. Weltweit arbeiten Forscher an der Optimierung aller Technologien. Aufgrund ihres Reifegrades, des hohen Leistungsgewichts und kurzer Reaktionszeit stellt sich die PEMFC als einzige derzeit in der Luftfahrt einsetzbare Technologie dar.

Den Vorteilen des emissionsfreien Betriebs und des hohen Wirkungsgrades stehen größere Herausforderungen gegenüber, die eine schnelle Einführung in der Luftfahrt verhindern und weitere Technologieentwicklung erfordern:

- Das Leistungsgewicht der Brennstoffzelle muss weiter verbessert werden. Bisher hat die Luftfahrt auf Brennstoffzellen-Stacks zurückgegriffen, die für Automobilanwendungen optimiert wurden und damit das Potenzial bezüglich des Leistungsgewichts nicht ausschöpfen.
- Trotz des hohen Wirkungsgrades entstehen in der Brennstoffzelle erhebliche Wärmemengen, die gekühlt werden müssen. Problematisch ist dabei die relativ niedrige Temperatur in der PEMFC-Brennstoffzelle von ca. 80 °C, die zu einer sehr geringen Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebung führt (bis zu 40 °C beim Start). Dies macht extrem große Kühlflächen erforderlich. Gasturbinen geben die Abwärme im Gegensatz dazu bei hohen Temperaturen und direkt im Abgasstrahl an die Atmosphäre ab.

**FREIGHT OPERATIONS**  
171 MMT CO<sub>2</sub>  
(19 % OF TOTAL)



CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Flugzeugklasse und Transport im Jahr 2018



Ultraleichter CFK-Hochdrucktank für Wasserstoff

- Die Speicherung des Wasserstoffs stellt auch bei Brennstoffzellen dieselbe Herausforderung dar wie beim Betrieb einer Gasturbine mit Wasserstoff. Die Integration des voluminösen Tanks in das Flugzeug wird eine neue Form von Leichtbau und neue Flugzeugkonzepte bedingen.

Hinsichtlich der Klimawirkung (unter anderem Einfluss auf die Bewölkung) des bei niedrigen Temperaturen emittierten Wasserdampfes (oder flüssigen Wassers) gibt es derzeit nur sehr rudimentäre Ergebnisse, das heißt, hier besteht erheblicher Forschungsbedarf um zu belastbaren Ergebnissen zu kommen und die angenommene reduzierte Kondensstreifenbildung zu verifizieren.

Aus heutiger Sicht hat die Brennstoffzelle in Verbindung mit nachhaltig produziertem Wasserstoff langfristig das Potenzial ausreichende Leistung und Reichweite für die kommerzielle Luftfahrt bereitzustellen und damit einen emissionsfreien Luftverkehr zu ermöglichen. Doch für die Luftfahrtanwendung befindet sich die Brennstoffzellenentwicklung noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Die Dimensionierung des Kühlsystems wird durch den Startfall bestimmt (hohe Leistung, geringe Temperaturdifferenz) und ist daher für Flugzeuge mit geringer Leistung deutlich einfacher und schneller umsetzbar. Aktuell werden ca. 43 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Flügen mit Flugstrecken unter 2.000 km ausgestoßen. Alle diese Segmente könnten mit Brennstoffzellentechnologie emissionsfrei umgesetzt werden.

Eine weitere mögliche Effizienzsteigerung wäre durch Hochtemperatur-Brennstoffzellen wie Festoxidbrennstoffzellen denkbar, da diese eine höhere Effizienz aufweisen und wegen ihrer höheren Betriebstemperatur auch effizienter kühlbar sind. Die gravimetrische Leistungsdichte dieses Brennstoffzellentyps ist allerdings noch deutlich zu gering für Luftfahrtanwendungen. Neben Themen wie Dichtungen, thermischen Rissen und schlechter Dynamik stellt die fehlende Vibrationsfestigkeit zudem eine Herausforderung für den kommerziellen Luftfahrtbetrieb dar. Hier bietet es sich an, zu untersuchen, inwiefern die Struktur des Flugzeugs durch Integration spezieller Funktionen (wärmeumwandelnde Konzepte, Kühlsysteme etc.) den Energiehaushalt des Systems optimieren kann.



.....

*„Aktuelle Ergebnisse zeigen, dass ein reines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Flugzeug realisierbar ist.“*

.....

Im Fokus der Luftfahrtforschung steht momentan die Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), die kurzfristig einen erfolgreichen Einsatz in der Luftfahrt verspricht. Erfahrungen der letzten 20 Jahre und Investitionen im Automobilbereich von über 15 Mrd. Euro sorgen dafür, dass die Dauerhaltbarkeit, Leistungsfähigkeit und Integration stark verbessert wurden. Es zeigte sich, dass Leistungsdichten im Kernsystem von bis zu 6 kW/kg möglich sind – weiterhin bei einem Wirkungsgrad von 50 %. Im Gesamtsystem inklusive Luftversorgung und Kühlung sind Leistungsdichten von 2,5 kW/kg realisierbar.

Aufgrund der Unterschiedlichkeiten von Komponenten und Eigenschaften im System (zum Beispiel Reaktionszeit) ist heutzutage im ersten Schritt eine Hybridisierung notwendig. Aktuelle Ergebnisse zeigen jedoch, dass ein reines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Flugzeug realisierbar ist. Durch das Superkondensatorverhalten werden kurzzeitige starke Ströme abgepuffert und das System wird gegenüber Kurzschlüssen abgesichert. Experimente bei niedrigen Temperaturen haben gezeigt, dass ein Kaltstart der Systeme ab -30 °C möglich ist, mit Vorkonditionierung auch bereits ab -50 °C. Bei sehr guter Steuerung und Regelung der relativen Feuchte und optimaler Luftkonditionierung vor dem Stack sind mit der heutigen Technologie hohe Temperaturen von bis zu 95 °C möglich und damit eine höhere Temperaturdifferenz, welche die nötige Kühlleistung vermindert. Die thermodynamisch optimierte Systemauslegung ist der Schlüssel für die Einsetzbarkeit.

Wasserstoff hat im Vergleich zu Kerosin oder synthetischen Kraftstoffen eine höhere Energiedichte. Bei gleichem Energiegehalt hat Wasserstoff als Kraftstoff demnach eine geringere Masse. Die Änderung der Flugzeugmasse während eines Fluges ist deutlich geringer, sodass der Unterschied zwischen Abflugmasse und Landemasse deutlich kleiner ist. Bei der Auslegung von entsprechenden Flugzeugkonfigurationen ist daher ein entsprechendes Hochauftriebssystem vorzusehen. Brennstoffzellen weisen eine relativ geringe Leistungsdichte auf, wodurch Fluggeschwindigkeit und sinnvolle Reichweiten zunächst begrenzt sein können.



Die Hy4 ist weltweit das erste viersitzige Passagierflugzeug, das mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Batterie-System angetrieben wird. Absolvierter Erstflug im Jahr 2016.

Je nach Art der Brennstoffzelle sind Wirkungsgrade von 45–70 % erreichbar. Je geringer der Wirkungsgrad, desto mehr Wärme muss aus dem Flugzeug abgeführt werden. Bei Festoxidbrennstoffzellen sind der potenzielle Wirkungsgrad und die Arbeitstemperatur von rund 800 °C sehr hoch, sodass der Kühlaufwand zwar unproblematisch ist, jedoch die Masse aufgrund der benötigten Materialien noch recht hoch ist. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Synergien könnten sich beim Einsatz von supraleitenden Motoren, Generatoren und Leistungsübertragungen für elektrische Konzepte hoher Leistung (> 10 MW) ergeben. Der zur Kühlung dieser supraleitenden Komponenten verwendete Wasserstoff kann direkt als Primärkraftstoff verwendet werden, was eine zweifache Nutzung des flüssig gelagerten Wasserstoffs mit sich bringt.



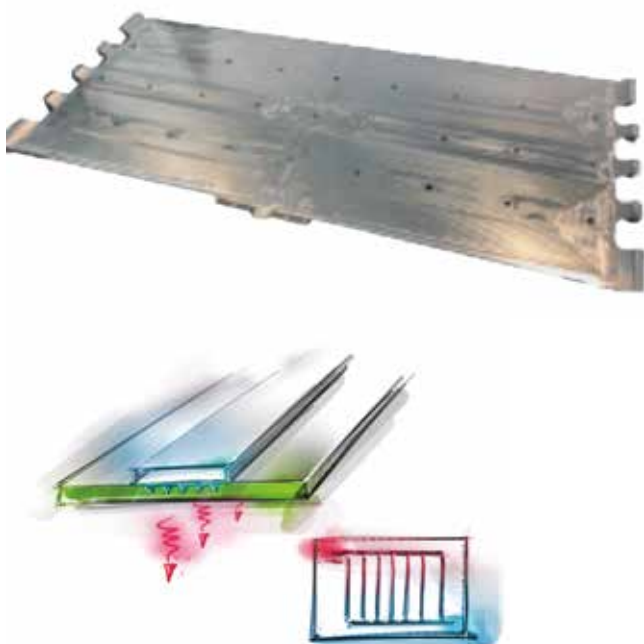
## 4.4. STRUKTUR UND SYSTEMINTEGRATION IN DER STRUKTUR

In den vorangegangenen Unterkapiteln werden verschiedenste Antriebsvarianten beschrieben. Sie alle haben gemein, dass die Energie zum Vortrieb des Luftfahrzeugs gespeichert, gewandelt und ein möglichst großer Teil davon dann an den umgebenden Luftstrom abgegeben werden muss, in dem sich das Luftfahrzeug bewegt.

Bei dieser Betrachtung darf die Struktur des Luftfahrzeugs in seiner Bedeutung nicht vergessen und unterschätzt werden. Einerseits ist es die Struktur beziehungsweise die Kabine, die der zahlende Fluggast erfährt und „für die er zahlt“, andererseits übernimmt die Struktur die tragende Rolle bei der Verbindung aller Systeme, angefangen von der Kabine, über den Auftrieb, den Antriebsstrang bis hin zur Avionik und weiteren. Die Struktur kann daher nie losgelöst von der Gesamtheit der Flugzeugauslegung betrachtet werden. Sie muss begleitend mit den neuartigen Antriebssystemen entwickelt werden, damit diese ihre spezifischen Vorteile erfolgreich einbringen und Erfordernisse erfüllen können. Die Anforderungen an der Struktur werden sich daher genauso disruptiv verändern wie das Antriebssystem.

Heute existierende Anforderungen wie Bereitstellung von Nutzraum, Tragfähigkeit/Lastenaufnahme, Isolation gegenüber kalter Luft, heißen Abgasen etc., Leichtbau bleiben überwiegend erhalten. Sie werden zusätzlich angereichert von der Anforderung, Systemfunktionen zu übernehmen.

Die zunehmende Elektrifizierung von Flugzeugen bringt eine Vielzahl von elektrischen Komponenten mit sich, die aufgrund ihrer Leistungsdichte mit großen Strömen und damit auch großen Leistungsverlusten arbeiten, die thermisch abgeführt werden müssen. Insbesondere in Flugzuständen, in denen kurzfristig viel Leistung umgesetzt wird – beispielsweise Start oder Durchstarten – entstehen Spitzenlasten, auf die das Gesamtsystem thermisch ausgelegt sein muss. Die Struktur muss dieser Variabilität im passiven und aktiven Kühlungsbedarf entgegenkommen und möglichst effizient – das heißt ohne zusätzliche, schwere monofunktionale Komponenten – diese Leitungs- und Kühlungsfunktion bereitstellen. Die in der Abbildung gezeigte Kühlplatte ist ein Beispiel dafür: Sie wird zwischen Batteriestacks im Multicopter „CityAirbus“ eingesetzt, führt Kühlwasser und trägt die Batteriestacks.



Multifunktionale Struktur: tragende Kühlplatte für Batteriestacks

In abstrakter Form unterscheiden wir heute folgende Funktionalitäten, die durch die Struktur neben ihrer tragenden Funktion ausgeführt werden können:



„Die Struktur muss begleitend mit den neuartigen Antriebssystemen entwickelt werden, um deren Vorteile erfolgreich einbringen zu können.“

## VOR- UND NACHTEILE ELEKTRISCH ANGETRIEBENER FLUGZEUGE IM PERSONEN- UND FRACHTTRANSPORT. (Die Tabelle berücksichtigt keine kleineren unbemannten Fluggeräte.)

Funktion	Status	Potenzial/Bedarf
Schalldämmung	Stand der Technik: Verwendung schalldämmender Materialien; großer Bedarf nach Systemen/Strukturen zur Reduktion von Engine Noise	
Thermalmanagement/Isolation	Sehr breites Themenfeld: Von der Isolation bis hin zur Energierückgewinnung als System; großer Bedarf an neuen Lösungen für neue Antriebe – Symbiose aus Antrieb-System-Struktur	
Energietransfer/leitung	Bislang angewandt als Masserückleitung/-grounding	
Energiespeicher	Nach heutigem Stand der Technik sehr ambitioniert; großes Risiko bei der Umsetzung	
Antenne	Erste strukturintegrierte Antennen in der Entwicklung, Umsetzbarkeit ist gut	
Absorption von energiereicher Strahlung (z. B. Radar)	„Low-Observability“-Eigenschaften sind im militärischen Bereich gefordert und partiell verfügbar („stealth“), jedoch in Deutschland nicht Stand der Technik und anspruchsvoll	 (militärisch)
Spezifische/konditionierte Bevorratung (z. B. „Battery-Housing“)	Im Fahrzeugbereich serientauglich fortgeschritten, im Luftfahrzeug noch kaum entwickelt; großer Bedarf und Potenzial	
Medien führen	Bsp.: Leitung von heißer Luft zur Enteisung: Ausprägung der Funktion heute als eigenständige Systeme flächendeckend verfügbar, integriert jedoch nicht, da Funktionstrennung nicht verfügbar	
Morphologische Eigenschaften (z. B. Piezo-Effekt)	Erste Funktionsdemonstratoren im R&T Umfeld verfügbar, Bsp.: Flächenaktuatorik	siehe 6.1
Energieerzeugend (z. B. Solarzelle)	Im Demo-Stadium seit Jahren verfügbar, Energieausbeute jedoch viel zu klein, Potenzial daher auch klein	
Safety	Bsp.: Struktur, die neben ihrer Tragfähigkeit feuerhemmend ist: Realisierung über Beschichtungen etc. denkbar	

Die Auflistung zeigt auf, wie relevant zusätzliche Aufgaben sind, die von der tragenden Hülle, der Struktur, übernommen werden können. Begreift man die bevorstehende Tiefe der Veränderung des Gesamtsystems Flugzeug bei Substitution des Antriebs, wird deutlich, dass die Struktur in Zukunft zusätzliche Aufgaben übernehmen muss.

Aus heutiger Sicht führt die Entwicklung zum emissionsfreien Flugzeug (ähnlich wie auch in der Autoindustrie) zunächst über eine Hybridisierung des heutigen Antriebssystems. Je stärker alternative Energieträger (wie Wasserstoff oder Batterien) Einzug finden, desto ausgeprägter wird die Funktionserweiterung der Struktur hinsichtlich Energie-Speicherung ausfallen.

Aufgrund der bereits beschriebenen großen Unterschiede in der Energiedichte zwischen Kraftstoff (meist Kerosin) heute und zukünftigen Speichermedien muss im allgemeinen davon ausgegangen werden, dass mehr Volumen in der fliegenden Struktur für die Funktion „Energie speichern“ vorgehalten werden muss. Klammert man in der Betrachtung synthetisch hergestellte Brennstoffe aus, so verbleiben Batterien und Wasserstoff als potenziell aussichtsreiche Energiespeicher. Strukturell stellen beide zusätzliche Anforderungen an die umgebende Struktur, sei es das größere Gewicht der Batterie einerseits oder andererseits die anspruchsvollen Temperatur- und Druck-Bedingungen für kryogenen Wasserstoff. Gasförmiger Wasserstoff ist aus heutiger Sicht keine gangbare Alternative zu verflüssigtem Wasserstoff aufgrund seines 5,6fach größeren spezifischen Volumens, das zu einem nochmals größeren Volumenbedarf in der Struktur des Flugzeugs führen würde.

In beiden Fällen (Batterie und kryogener Wasserstoff) ist offensichtlich, dass die Struktur eine erhebliche Änderung erfahren wird, um diesen spezifischen Randbedingungen des Energiespeicherns gerecht zu werden, siehe folgende Abbildung.

## 4.5. WEITERE ANFORDERUNGEN FÜR DAS ELEKTRISCHE FLIEGEN

Die Zulassung von neuartigen Luftfahrtkomponenten ist eine Haupt-herausforderung für die Einführung von elektrischen Antrieben in der Luftfahrt. Der ohnehin langsame und teure Zulassungsprozess wird bei elektrischen Antrieben zusätzlich dadurch verschärft, dass es derzeit keine etablierten Nachweisverfahren für elektrische Luftfahrtantriebe gibt.

Außerdem stellen die hohen Leistungsbedarfe von Luftfahrtantrieben im Bereich von mehreren Megawatt besondere Anforderungen an das elektrische System. Diese äußern sich in hohen Spannungen und Strömen, die sicherheitsrelevante Folgen haben können, wie zum Beispiel Spannungsüberschläge und Verlustleistungen. Auch für die Sicherheit einzelner Komponenten wie Lithium-Ionen-Batterien sind derzeit keine nachgewiesenen Konzepte verfügbar. Demgegenüber stehen mögliche inhärente Redundanzen von elektrischen Systemen, wie zum Beispiel im Aufbau von Elektromotoren mit mehreren Wicklungen oder in der Paketierung von Batterien. Diese technologischen Herausforderungen sind Gegenstand vieler Forschungs- und Demonstrationsprojekte. Es ist allerdings mit einer erheblichen Vorlaufzeit zu rechnen, bis Lösungen am Markt etabliert sind.

.....

*„Die Zulassung von neuartigen Luftfahrtkomponenten ist eine der Hauptherausforderungen für die Einführung von elektrischen Antrieben in der Luftfahrt.“*

.....

## AKTUELLER HANDLUNGSBEDARF

- Es müssen die Leistungs- und Energiedichte von allen Komponenten im System erhöht werden, um die Reichweite und Effizienz elektrischer Flugzeuge zu erhöhen.
- Es müssen Zulassungsrichtlinien für elektrische Komponenten und Antriebssysteme entwickelt werden.
- Die Frage nach einer effizienten Speicherung von Wasserstoff muss gelöst werden.
- Es besteht Forschungsbedarf im Systemverständnis der verschiedenen hybrid-elektrischen Varianten. Daher sind nicht nur numerische Analysen notwendig, sondern auch experimentelle und reale Untersuchungen auf Prüfständen erforderlich.
- Im Bereich Brennstoffzelle muss zusätzlich das Wärmemanagement optimiert und eine effiziente Kühltechnologie entwickelt werden. Die Potenziale multifunktionaler Strukturen müssen herausgestellt und genutzt werden.
- Die Struktur muss entsprechend den spezifischen Erfordernissen des gewählten Antriebsstranges entwickelt werden, insbesondere, um die Fragen nach der effizienten/multifunktionalen Integration von Systemfunktionen beantworten zu können.
- Mit neuen Kraftstoffen/Energiespeichermedien entstehen zahlreiche Fragen zur Betriebssicherheit, die häufig durch strukturelle Vorkehrungen beantwortet werden können. Hier besteht großer Bedarf an Forschung.
- Das Leistungs-Managementsystem muss untersucht und weiterentwickelt werden.
- Der Einfluss elektrischer Antriebssysteme und Antriebsintegrationen auf das Gesamtsystem muss weiter untersucht werden, unter anderem im Bereich verteilte Antriebe, der Grenzschichteinsaugung und des Systemleichtbaus mit integrierter Verteilung elektrischer Leistungen und thermischer Belastungen.
- Die extrem enge Kopplung von Triebwerk und Flugzeug, und damit die Notwendigkeit die Triebwerks-Innenaerodynamik und Flugzeug-Außenaerodynamik parallel zu betrachten, muss berücksichtigt werden, um valide Aussagen für das Gesamtsystem machen zu können.
- Die widerstandsarme Integration von Wärmetauschern mit hoher Effizienz bei geringen Temperaturdifferenzen erfordert eine gemeinsame Optimierung von Kühlluftführung, Zelle und Systemkomponenten.
- Lärmforschung: Insbesondere bei Konzepten wie Grenzschichteinsaugung oder verteilten Antrieben sind sowohl das Außen- als auch das Kabinengeräusch hinsichtlich Schalldruck und Frequenzspektrum zu optimieren.
- Angefangen mit den Regelungsplattformen bis hin zur Softwareeinbettung der Steuerungsalgorithmen liegt die Herausforderung bei der Erfassung und Verarbeitung des Systemzustandes.
- Die Leistungsverteilung und die Betriebssicherheit sind der Schlüssel für die Einführung der elektrischen Antriebstechnologie. Dabei kann Betriebssicherheit aus Redundanzgründen nur mit einer modularen Leistungsverteilung erreicht werden.
- Studien zu Luftfahrzeugen mit batterie-elektrischen, turbo-hybrid-elektrischen und brennstoffzellen-hybrid-elektrischen Antrieben zur Ermittlung des optimalen Gesamtkonzepts sind erforderlich.

# VERBESSERTE FLUGROUTEN, BODENPROZESSE UND INFRASTRUKTUR



Um einen möglichst geringen ökologischen Fußabdruck zu erzeugen, muss die Luftfahrt nicht nur an den Antrieben arbeiten. Auch Aspekte wie die Flugführung, Bodenprozesse und Infrastrukturen müssen auf die neuen Herausforderungen angepasst werden.

## 5.1. FLUGFÜHRUNG MIT MINIMALER KLIMAWIRKUNG

Heutzutage wird die Fokussierung auf die Flugsicherung durch die Minimierung der Kosten getrieben, das heißt, es werden nur die Umweltaspekte berücksichtigt, die mit den Direct Operating Costs (DOC) verbunden sind, wie zum Beispiel CO<sub>2</sub> aufgrund seiner Korrelation zum Kraftstoffverbrauch. Andere Umweltauswirkungen werden aufgrund der damit verbundenen Gebühren berücksichtigt, zum Beispiel Lärm- oder NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Umgebung von Flughäfen, die entsprechende Vorschriften erlassen haben.

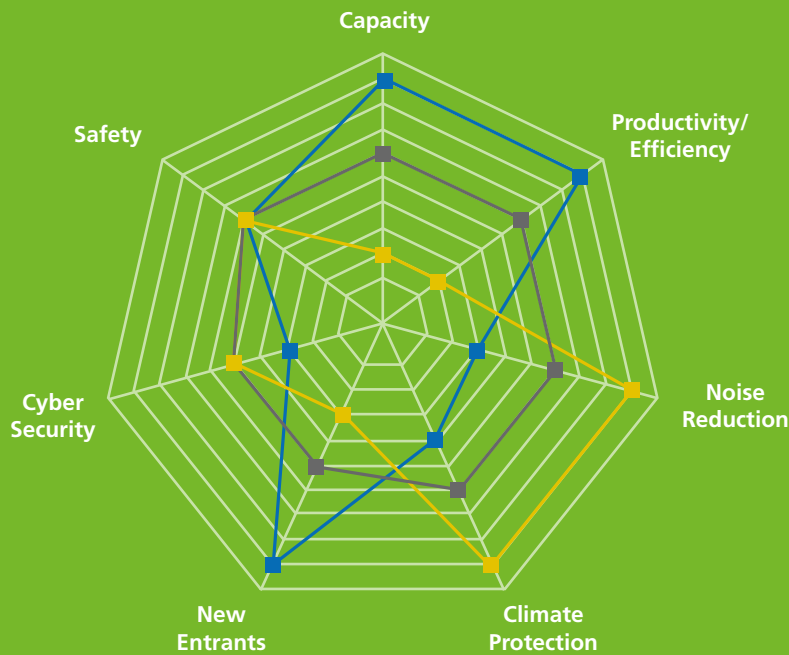
Die Veränderungen der atmosphärischen Ozon- und Methankonzentrationen sowie die Bildung von Kondensstreifen und -zirren tragen ebenso zur Erderwärmung bei. Sie werden aber derzeit in der Flug-

führung aufgrund fehlender Anreize nicht berücksichtigt. Wie oben beschrieben, sind die Klimaauswirkungen durch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte stark von der Flughöhe, der geografischen Lage und dem Zeitpunkt der Emission abhängig, das heißt sowohl vom Tages- als auch vom Saisonzyklus und der aktuellen Wetterlage. Daher können die Klimaauswirkungen des Luftverkehrs durch die Vermeidung von klimasensitiven Regionen, in denen die Emissionen die größten Auswirkungen haben, reduziert werden.

Studien des DLR zeigen, dass bereits kleine Änderungen im Routing mit reduzierten Auswirkungen auf die Betriebskosten von nur 1 % zu einer Verringerung der Klimaauswirkungen um bis zu 10 % führen. Das wurde in erster Linie durch Vermeidung von Gebieten erreicht, in denen erwärmende Kondensstreifen-Zirren entstehen, aber auch durch eine Verringerung der Klimaeffekte, die durch die NO<sub>x</sub>-Emissionen ausgelöst werden. Die geringe Kostensteigerung durch optimiertes Routing könnte durch marktbasierende Maßnahmen ausgeglichen werden, indem ungewünschte Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte mit zusätzlichen Kosten belegt würden. Die Forschung zeigt, dass die größte tägliche Reduktion mit bis zu 56 % der Klimaauswirkungen für bestimmte Wetterlagen erreicht wird, verglichen mit dem Weg der minimalen wirtschaftlichen Kosten unter gleichen Bedingungen. Diese Reduktionen wären dann mit Kostensteigerungen bis zu 11 % verbunden.

Die Implementierung eines klimaschonenden Routings stellt jedoch noch einige technische Herausforderungen auf Ebene der Flugsicherung dar, da diese derzeit stark auf festen Routen aufbaut. Eine vorläufige Minderungsstrategie bis dahin können relativ statische klimaschutzbeschränkte Lufträume (Climate Restricted Airspaces, CRA) sein. Diese Lufträume würden durch 3D-Klimaänderungsfunktionen definiert, die die Umweltauswirkungen von Flugzeugemissionen an bestimmten Orten vorhersagen. Ähnlich wie militärische Sperrzonen könnten die klimaschutzbeschränkten Lufträume je nach Wetterlage geschlossen oder für den Verkehr freigegeben werden.





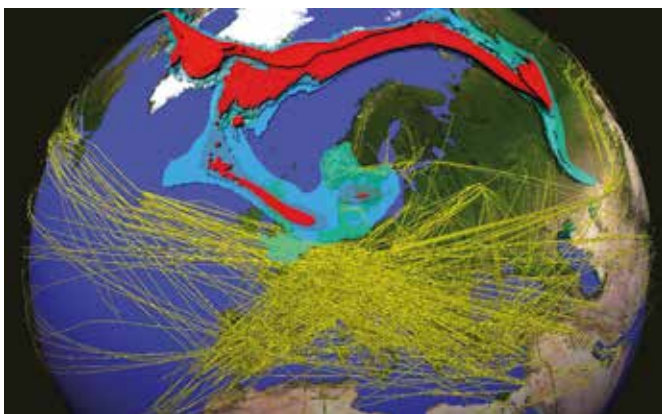
- Mobility
- Environment
- Reference

Die Ozonbildung durch  $\text{NO}_x$  kann generell durch den Flug in niedrigeren Höhen reduziert werden. Dazu wären zum einen verbesserte Designs für die geänderte Flughöhe nötig. Zum anderen ist ein Flug in größeren Höhen wegen der geringeren Luftdichte immer schneller und kraftstoff-effizienter. Geringere Flughöhen dürften daher generell zu längeren Flugzeiten, einem höheren Kraftstoffverbrauch und damit zu entsprechenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen und Betriebskosten führen, wobei die  $\text{CO}_2$ -bedingte zusätzliche Klimaerwärmung durch die schwächere Erwärmung aufgrund der  $\text{NO}_x$ -Effekte kompensiert wird.

Ein einfaches Verfahren zur Verringerung der Emissionen im Sinkflug ist zudem der Continuous Descent Approach (CDA) oder Continuous Descent Operations (CDO). Dabei wird das Triebwerk im Sinkflug in niedrigster Leistungseinstellung gefahren – dies reduziert so den Kraftstoffverbrauch und die Lärmbelastung. Im Gegenzug dauert der Sinkflug länger, was Auswirkungen auf die Flughafen-Kapazität mit sich bringt, und das Flugzeug reagiert träger. Das Verfahren ist daher

nur bei günstigen Wetter- und Verkehrsbedingungen möglich. Eine Reduktion der Fluggeschwindigkeit kann den Kraftstoffbedarf und die damit verbundenen Energiekosten reduzieren. Gleichzeitig wird jedoch die jährliche Transportarbeit der Airline durch die längere Flugzeit pro Strecke reduziert. Die auf die Transportarbeit bezogenen Kosten als relevante Größe der Konfigurationsbewertung können dabei je nach Airline und bestehender Kostenstruktur dann entsprechend sinken oder steigen.

Während die Einführung einer neuen Technologie für die Weltflugzeugflotte in der Regel langwierig ist, könnten neue operative Maßnahmen dagegen in kürzester Zeit auf einen wesentlichen Teil der Flotte angewendet werden. Um die Probleme infolge des anhaltenden Wachstums des Luftverkehrs zu überwinden, beschloss die Europäische Kommission eine Defragmentierung des europäischen Luftraums zur Schaffung des einheitlichen europäischen Luftraums, des sogenannten Single European Sky. Ziele sind die Verringerung von Verspätungen und die Verbesserung der Sicherheit und Flugeffizienz, wodurch die Umweltbelastung und die Kosten der Luftfahrt reduziert werden. Die Single European Sky ATM-Forschung (SESAR) konzentriert sich auf die Modernisierung des europäischen Luftraums durch die Definition, Entwicklung und Bereitstellung neuer oder verbesserter Technologien und Verfahren (SESAR Solutions). Die Einführung des Single European Sky hat als Nebeneffekt, dass sich klimaoptimierte Flugtrajektorien leichter realisieren lassen.



Quantifizierung der Klimaauswirkung sowie Wettereinflüsse und Flugroutenoptimierung



## 5.2. BODENPROZESSE MIT MINIMALER KLIMAWIRKUNG

Auch die Prozesse am Boden können wesentlich zu einer reduzierten Umweltwirkung des Luftverkehrs beitragen. Obwohl Triebwerke vor ihrem vollen Einsatz ein Warm-up benötigen, sollten insbesondere Leerlaufzeiten des Triebwerks am Boden minimiert werden. Ein Großraumflugzeug wie ein A380 kann in 15 Minuten Aufenthalt auf dem Rollfeld eine Tonne Kerosin verbrennen. Elektrische Schleppfahrzeuge können diese Emissionen am Boden erheblich verringern, wie der Betrieb des TaxiBots der Lufthansa am Frankfurter Flughafen zeigt.

Für die Unterstützung von neuartigen Flugzeugantrieben wie Wasserstoff-Turbinen oder elektrischen Antrieben sind zudem auch neue Prozesse am Boden erforderlich. Die Herausforderung wird sein, die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit dieser Prozesse zu sichern. So müssen Wasserstofftanks oder Batterien in ausreichend kurzer Zeit aufgeladen werden können, um die Standzeit des Flugzeugs möglichst gering zu halten. Derzeit beträgt die Aufenthaltsdauer am Flugsteig etwa eine halbe Stunde. Eine solch kurze Ladezeit ist für die Batterie eine starke Herausforderung, sodass für batterie-elektrische Flugzeuge der Tausch der Batterien nötig werden könnte oder längere Standzeiten eingeplant werden müssen. Zudem würden Ladezeiten den kritischen Pfad bei den Abfertigungsprozessen darstellen und sich somit direkt auf andere Vorfeld- und Terminalprozesse auswirken. Pünktlichkeit und empfundener Servicelevel der Passagiere sind hiervon direkt betroffen.

## 5.3. INFRASTRUKTUR FÜR NEUARTIGE FLUGZEUGANTRIEBE

Die aktuelle Luftfahrtinfrastruktur ist derzeit für die schnelle Betankung von Flugzeugen mit Kerosin ausgelegt. Eine Betankung mit Wasserstoff, aber auch das Aufladen mit elektrischer Energie erfordern zusätzliche Infrastrukturen wie Wasserstoff- und Stromleitungen. Falls Batterien am Flughafen wegen der kürzeren Umlaufzeit ausgetauscht werden sollen, werden zusätzliche logistische Prozesse und große Batterielager und -ladevorrichtungen benötigt. Solche Infrastrukturen bedürfen umfangreicher Investitionen und jede Technologie, für die Infrastruktur vorgehalten wird, belegt Flächen, die dann oft für andere Verwendungen nicht mehr zur Verfügung stehen. Hier müssen die technische und ökonomische Machbarkeit bis hin zu Fragen von Resilienzen sowie der Sicherheit und Akzeptanz in der Bevölkerung untersucht werden.

Für den flächendeckenden Einsatz von Elektrizität in der Luftfahrt würde ein erheblicher Ausbau erneuerbarer Energien benötigt, das Stromnetz müsste für die Verteilung dieser Energie ausgebaut werden und der Flughafen selbst müsste Infrastruktur vorhalten, um die Energie an die Flugzeuge zu verteilen. Der Flughafen Frankfurt beispielsweise vertankt ca. 15 Mio. Liter Kerosin am Tag. Dies entspricht rechnerisch mehr als 130 GWh elektrischer Energie am Tag. Der jährliche Stromverbrauch des Flughafens liegt derzeit bei etwa 600 GWh. Es würde demzufolge ein immenser Ausbau des Stromnetzes im Umfeld des Flughafens um den Faktor 80 benötigt. Für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland würde eine solche Umstellung ebenfalls eine enorme Herausforderung bedeuten. Erste Konzepte wie im Konsortium Innovative Flugplatzstrategien für einen emissionsarmen Regiolluftverkehr (KIFER) schlagen daher eine dezentrale Infrastruktur

vor. Da Flughäfen typischerweise große Flächen belegen, könnte die benötigte Energie zunächst für Regionalflughäfen direkt vor Ort auf erneuerbare Art gewonnen werden.

Damit Flugzeuge weltweit einsetzbar sind, müssen die Schnittstellen zum Stromnetz ausreichend standardisiert werden. Das betrifft im einfachsten Fall den Ladestecker. Falls Batterien ausgetauscht werden, müssen aber auch die Batterieschächte und Batteriepakete genormt sein, um so eine möglichst breite Verwendung zu ermöglichen und eine Vielzahl von Ladetechnologien und Lagerplätzen unter entsprechendem Flächenverbrauch zu vermeiden. Zudem muss eine Lösung gefunden werden, die Abnutzung der Batterien über verschiedene Flugzeuge abzuschreiben. Dies ist auch im Interesse der Sicherheit notwendig, um auszuschließen, dass fehlerhafte Batterien in Flugzeuge eingesetzt werden. Auch die teils sehr spezifischen Anforderungen an Lade- und Entladestrom sowie einzuhaltende Temperaturen und der Schutz vor Explosions- und Brandgefahren stellen Anforderungen an die vorzuhaltende Infrastruktur.

Die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien ist ein energieintensiver Prozess, sodass Konzepte zur weiteren Verwendung (Second-Life/Reuse) die Lebensdauer verlängern und somit den ökologischen Fußabdruck deutlich reduzieren können. In diesem Kontext ist die Degradation der Batteriekapazität zu sehen, da sie ab der Unterschreitung einer definierten Grenze (zum Beispiel 80 % der Ausgangskapazität) für den Einsatz in Flugzeugen zum Beispiel aufgrund von Reichweitenverlust nicht mehr geeignet sind. Denkbare Ansätze zur Weiterverwendung von aus der Luftfahrt ausgemusterten Batterien werden vor allem im Bereich der stationären Anwendung gesehen. Batteriemodule mit ähnlicher Leistung und Lebensdauer werden aussortiert und in neue „wiederverwendbare“ Batteriepakete eingebaut, die dann als Energiespeicher in Versorgungsnetzen, in Gebäuden oder in der Telekommunikation dienen. Gleichzeitig können sich dadurch wirtschaftliche Vorteile ergeben, da die eingesetzten Materialien lange im Kreislauf verweilen. Da es an einer Standardisierung der Batterien und der verschiedenen Chemikalien mangelt, sollte der Benutzer der Second-Life-Batterie seine Anwendung genau darauf abstimmen. Darüber hinaus kann sogar das gleiche Modell von Batterien zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt worden sein oder auf unter-

schiedliche Weise behandelt worden sein, sodass sie nach ihrer Lebensdauer unterschiedliche „Eigenschaften“ haben können. Gleichermaßen fehlt es an Mechanismen, die Anreize zur Weiterverwendung schaffen und das Second-Life von Li-Ion Batterien ermöglichen.

Neben dem ökologischen Fußabdruck ist der wirtschaftliche Aspekt von Lithium-Ionen-Batterien ein Schlüsselfaktor für die Elektrifizierung von Flugzeugen. Der Großteil des wirtschaftlichen Wertes einer Lithium-Ionen-Batterie fällt auf die eingesetzten Werkstoffe (wie zum Beispiel Kobalt, Lithium, Kupfer, Graphit, Nickel, Aluminium und Mangan) zurück. An dieser Stelle ergibt sich ein hohes Potenzial zum Recycling der ausgemusterten Lithium-Ionen-Batterien. Die Hauptmotivation des Recyclings kann demnach in der (Rück-)Gewinnung von Rohstoffen beziehungsweise in der Verringerung der Erschöpfung von Rohstoffen gesehen werden. Trotz der Weiterentwicklung von Recyclingverfahren werden unter Umständen infolge des raschen Wachstums der Elektromobilität im Allgemeinen große Mengen an Lithium-Ionen-Batterien entsorgt werden müssen.

Um die Auswirkungen des Einsatzes von Lithium-Ionen-Batterien ganzheitlich zu erfassen, bedarf es interdisziplinärer ökologischer Lebenszyklusbewertungen, welche die oben genannten Aspekte aufgreifen und im Detail beleuchten. Die LCA verfolgt alle Energie- und Materialein- und -ausgänge zur Herstellung eines bestimmten Produkts von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Entsorgung. Sie kann helfen, die Vorteile des Batterierecyclings zu quantifizieren und zu ermitteln, wo Prozessverbesserungen oder Materialsubstitutionen den größten Einfluss haben könnten. Neben der Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien sind zudem auch alternative Batteriekonzepte (zum Beispiel Metall-Luft-Batterien) mit ihren Vor- und Nachteilen für die Luftfahrt zu betrachten und ökologisch zu bewerten.

Zur Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff und der entsprechenden Tankstelleninfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Ein großer Vorteil bei der Luftfahrtanwendung liegt darin, dass nur eine geringe Anzahl an Tankstellen benötigt wird und es voraussichtlich ausreicht, an zentralen Flughäfen entsprechende Tankstellen vorzuhalten. Ein zu langsamer Ausbau der Infrastruktur wie im Mobilitätssektor ist damit im Luft-

.....

*„Für den Betrieb neuartiger Flugzeugkonzepte müssen infrastrukturelle Maßnahmen frühzeitig identifiziert und berücksichtigt werden.“*

.....

fahrtbereich nicht zu erwarten. Die Luftfahrt kann aber vom Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur im Bodenverkehr profitieren. Bereits eine Standardisierung der Pkw-Tankstellen verspricht wesentliche Verbesserungen im Bereich der Kosten, Genehmigungsverfahren, Wartung und Zuverlässigkeit. Die im Mobilitätssektor entwickelten Technologien können weitgehend auf die Luftfahrtanwendung übertragen werden. Allerdings wird die Wasserstoffbetankung bei Luftfahrtanwendungen in flüssiger Form erfolgen, im Mobilitätssektor wird der Wasserstoff dem Anwender in der Regel gasförmig bei hohen Drücken bereitgestellt.

Für die komplette Versorgung eines Flughafens wie Frankfurt wären etwa 4 Mio. kg Wasserstoff am Tag notwendig. Die Auswahl der H<sub>2</sub>-Versorgungsoption hängt primär vom Standort und den lokalen Gegebenheiten ab:

- Eine Anlieferung im Lkw kann dabei bis zu 4.000 kg flüssigen Wasserstoff beinhalten. Dies ist vor allem für erste Demonstrationen mit geringem Kraftstoffbedarf oder für kleinere Landeplätze im städtischen Bereich sinnvoll.
- Eine Pipeline-Verbindung zu einer H<sub>2</sub>-Quelle ist nötig, um kontinuierlich große Mengen Wasserstoff zu liefern und um Flugplätze mit höherem Verkehrsaufkommen zu versorgen. Im Jahr 2017 gab es knapp 400 km Wasserstoff-Pipelines in Deutschland, weltweit fast 5.000 km.
- Die Erzeugung von Wasserstoff via Elektrolyse direkt am Ort der Tankstelle ist eine weitere Option. Diese Option ist vor allem für großflächige Flughäfen möglich und bei deren hohem Verkehrsaufkommen auch besser finanzierbar.

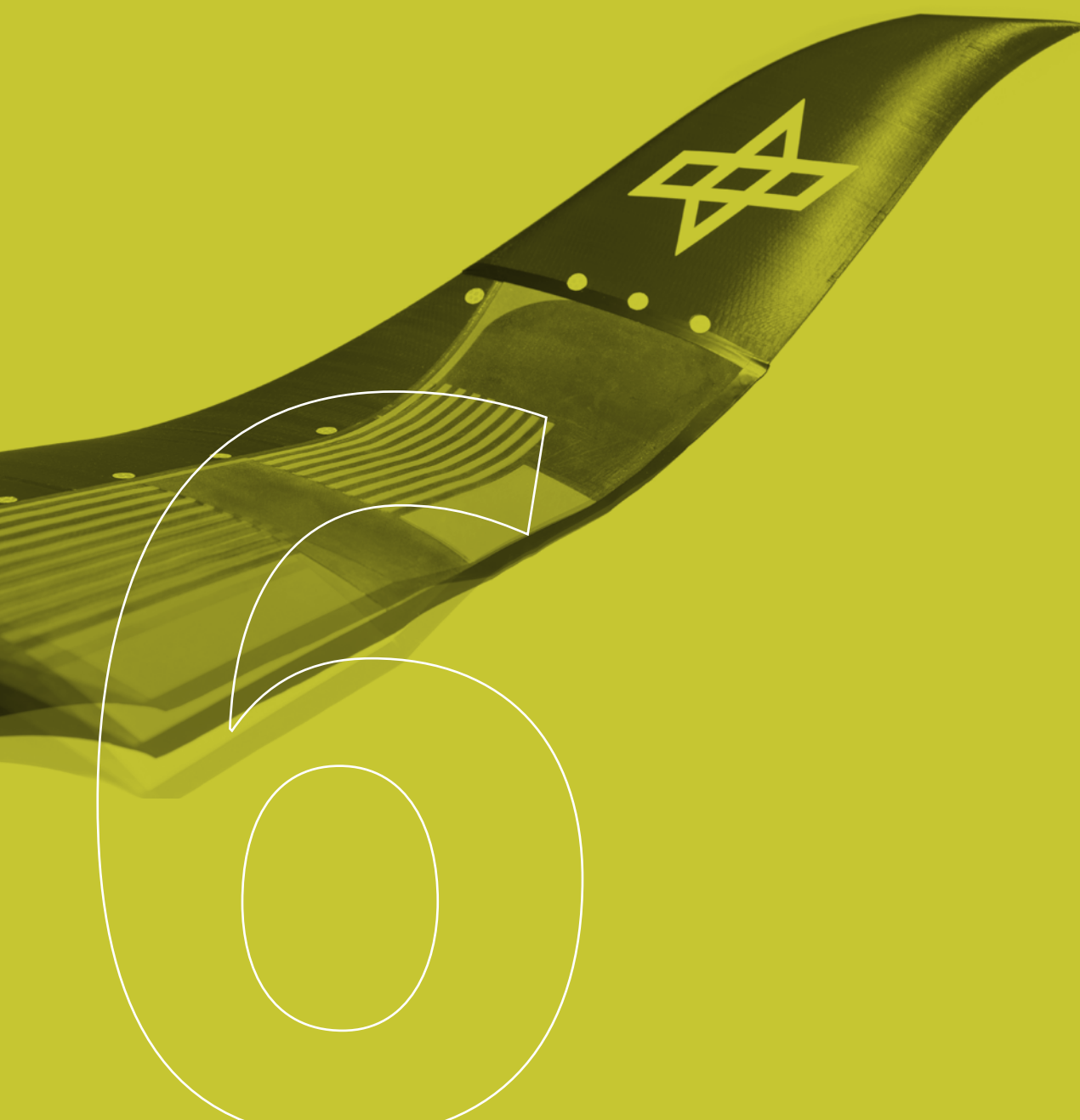
Weitere Technologien zum Transport von Wasserstoff wie die zeitweise Speicherung von Wasserstoff in einem flüssigen Trägermedium wie Öl befinden sich derzeit in der Entwicklung. Die Investitionskosten für eine mit verflüssigtem Wasserstoff versorgte H<sub>2</sub>-Tankstelle liegen dabei derzeit bei etwa 2 Mio. Euro und werden bis 2050 auf etwa 1,5 Mio. Euro fallen.

Hier zeigt sich, dass erforderliche infrastrukturelle Maßnahmen, die für den Betrieb von alternativen Flugzeugkonzepten notwendig sind, frühzeitig identifiziert werden müssen. Neben der Abbildung der Effekte auf die reine Flughafeninfrastruktur gilt es auch Synergien mit anderen Sektoren außerhalb der Luftfahrt zu berücksichtigen wie zum Beispiel eine dezentrale Energieerzeugung über Flughafenbereiche, elektrochemische Energiespeicherung am Flughafen oder die Herstellung von Energieträgern vor Ort.

## AKTUELLER HANDLUNGSBEDARF

- Identifizierung und Lösung technischer Herausforderungen zur Implementierung von klimaschonenden Routings auf Ebene der Flugsicherung.
- Die Ozonbildung durch NO<sub>x</sub> kann generell durch den Flug in niedrigeren Höhen reduziert werden. Entwicklung verbesserter Designs für die geänderte Flughöhe notwendig, um die Ozonbildung durch NO<sub>x</sub> durch den Flug in niedrigeren Höhen zu reduzieren.
- Der Bodenverkehr am Flughafen sollte elektrifiziert werden, um hier die Emissionen erheblich zu reduzieren.
- Für den Betrieb neuartiger Flugzeugkonzepte müssen infrastrukturelle Maßnahmen frühzeitig identifiziert und berücksichtigt werden. Während zur Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff die Verfügbarkeit von Wasserstoff und die entsprechende Tankstelleninfrastruktur notwendig sind, müssen für elektrische Konzepte weltweit die Schnittstellen zum Stromnetz standardisiert werden.

# DIE AUSWIRKUNG AUF FLUGZEUG- EBENE



Der Einsatz von elektrischen Antrieben ermöglicht die Nutzung einer Reihe an vorteilhaften Technologien im Flugzeug wie die Auftriebserhöhung und Reduktion der Steuerflächen durch verteilte Propulsoren. Beim Antrieb selbst ergeben sich voraussichtlich unter anderem Vorteile in der Optimierung des Betriebspunkts, in der Nutzbarkeit komplexer Kreisprozesse durch die Integration im Rumpf und in einem hohen Vortriebswirkungsgrad trotz Größenbeschränkung des Triebwerks durch eine Vielzahl von Propulsoren. Dem stehen jedoch Nachteile wie ein hohes zusätzliches Gewicht, zusätzliche Verluste infolge der Energiewandlung, ein komplexes System und hohe Kosten gegenüber. Nur eine intelligente Kombination der Vorteile von Flugzeug und Antrieb bei Minimierung der Nachteile kann ein erfolgreiches neues Flugzeug- und Antriebskonzept liefern. Zusätzlich zu den möglichen konfigurativen

Vorteilen von elektrischen Antrieben werden durch die verschiedenen Antriebsarten aber auch Änderungen an der Konfiguration des Flugzeugs notwendig, die eine reibungslose Integration der neuen Technologie ins Gesamtsystem ermöglichen. Dadurch ergeben sich auch neue Bilanzen im Lebenszyklus eines Flugzeugs. Um diese Aspekte umfassend bewerten zu können, ist eine disziplin-übergreifende Fähigkeit zum Entwurf und zur Bewertung des Gesamtsystems notwendig, die die deutsche Luftfahrtlandschaft unbedingt aufbauen und erhalten sollte.

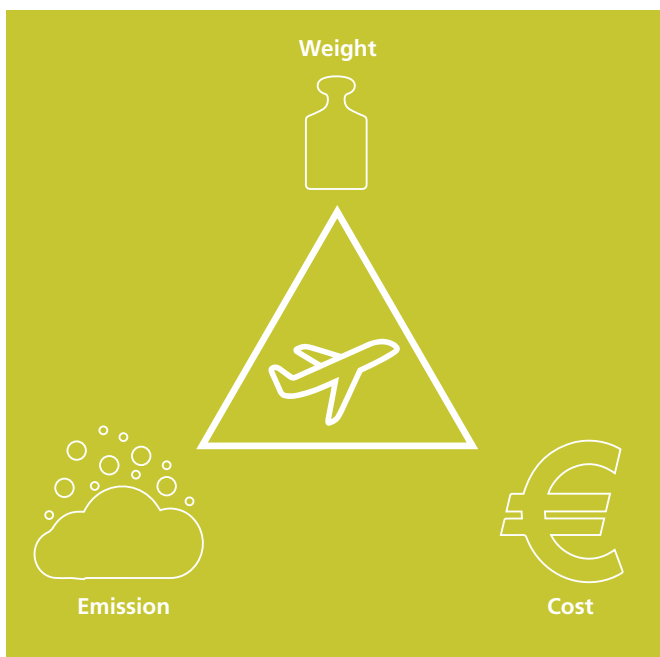
## **6.1. KONFIGURATIVE MÖGLICHKEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN**

Das Potenzial, klimaneutral zu fliegen, hängt in erster Linie von den oben genannten Energieträgern ab. Diese bestimmen im hohen Maß die Gesamtstruktur des Flugzeugs, die Antriebstechnologie, aber auch die Konfiguration und die Flugleistungen selbst. Alle Antriebsarchitekturen beeinflussen die Hauptgütermerkmale von Flugzeugen:

„Neue Materialien, Bauweisen und die Integration elektrischer und thermischer Systeme in die Tragstruktur bieten ein Einsparpotenzial der Flugzeuggesamtmasse von bis zu 40 % gegenüber heutigen Flugzeugstrukturen.“

- Antriebseffizienz (spezifischer Energiebedarf)
- Aerodynamische Effizienz (Gleitzahl)
- Systemleichtbau (Betriebsleermasse)
- Sicherheit (Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems)

Jeder Energieträger und die entsprechenden Antriebstechnologien beeinflussen darüber hinaus noch die Betriebskosten, bringen infrastrukturelle Randbedingungen mit sich oder haben Vor- und Nachteile hinsichtlich Herstellung, Wartung und Außerdienststellung/Recycling und haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Lärmemission.



Herausforderungen, Komponenten und Systeme

#### INTEGRATION NEUER TECHNOLOGIEN IN DEN FLUGZEUG-ENTWURF

Die Effizienzverbesserungen der aktuellen Flugzeuggenerationen gegenüber den älteren Mustern wurden maßgeblich durch Entwicklungen in der Triebwerkstechnologie hin zu höheren Nebenstromverhältnissen und durch eine Verbesserung der Flügelaerodynamik erreicht. Die weitere Steigerung des Antriebswirkungsgrades und die Integration sehr großer Triebwerke stellen weiterhin ein großes Potenzial dar, klimaschonende Flugzeuge zu entwerfen und einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten zu können. Der Integration immer größer werdender Triebwerke sind jedoch geometrische, strukturelle und aerodynamische Grenzen gesetzt; insbesondere am Rumpf und Flügel. Stetige Verbesserungen der strukturellen Güte tragen ebenfalls zum ökologischen und ökonomischen Betrieb bei. Teilweise müssen in diesen Gebieten auch Nachteile der neuartigen Antriebsarchitekturen auf Flugzeugebene kompensiert werden. Insbesondere elektrisches oder hybrid-elektrisches Fliegen bedeuten für den Leichtbau einen Paradigmenwechsel: War der Leichtbau bisher für die sichere Abtragung von mechanischen Lasten erforderlich, wird er künftig auch die Verteilung elektrischer Leistungen und zu großen Teilen die Aufgaben des Thermalmanagements mit übernehmen müssen, um Zusatzmassen zu kompensieren und Flugleistungen sowie Missionssicherheit zu maximieren. Aus Leichtbau wird Systemleichtbau. Neue Materialien, Bauweisen und die Integration elektrischer und thermischer Systeme in die Tragstruktur bieten ein Einsparpotenzial der Gesamtmasse von bis zu 40 % gegenüber heutigen Flugzeugstrukturen.

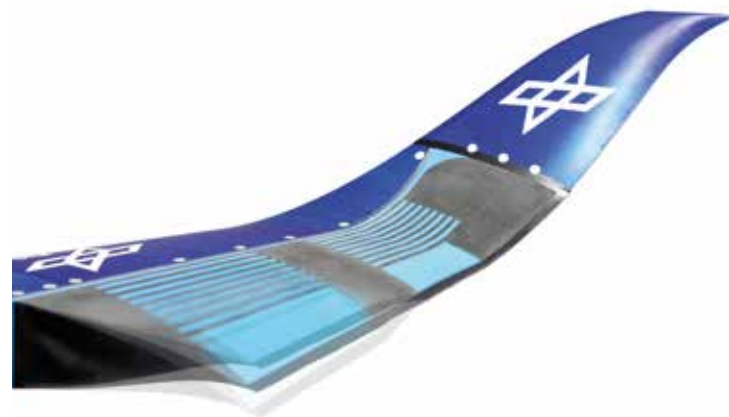
Durch die digitale Transformation ergeben sich hier Möglichkeiten, bereits beim Erstellen des Flugzeugentwurfs das mögliche Endresultat mit allen seinen Wechselwirkungen zu simulieren.



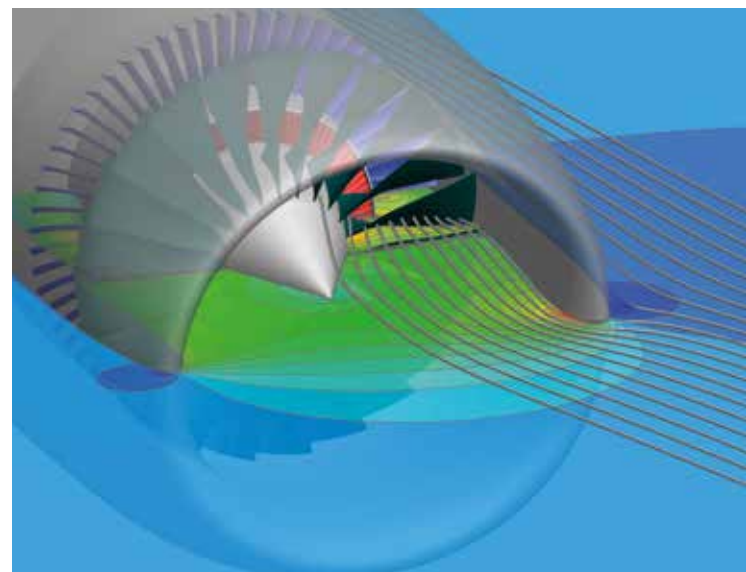
Die aerodynamische Güte einer Flugzeugkonfiguration hat zudem einen erheblichen Einfluss auf den erforderlichen Energieaufwand für die Transportmission. Die Auslegung von Flügel und Rumpf sowie die aerodynamische Integration von Triebwerk und Leitwerken und insbesondere die Widerstandsminimierung gehören damit zu den Schlüsseltechnologien auf dem Weg zum emissionsfreien Fliegen. Auch hier können Nachteile der neuartigen Antriebsarchitekturen ausgeglichen werden. Dabei ist eine ganze Reihe von Technologien wie natürliche und hybride Laminarhaltung, Riblets, Morphing und verteilte Antriebe denkbar. Gerade bei großen umspülten Flächen wie Wasserstofftanks wäre zudem die Technologie der Grenzschicht-Ab-saugung sinnvoll einsetzbar. Hier könnten Effizienzvorteile von bis zu 20 % erreicht werden.

Retro-fit spielt für die Optimierung der aktuellen globalen Flugzeugflotte hinsichtlich ihrer Klimawirkung eine große Rolle, um frühzeitige Emissionsreduktionen zu gewährleisten. Radikale Technologien sind als Retro-fit-Lösungen jedoch nicht sinnvoll, da das gesamte Flugzeug hinsichtlich der Optimierungszielgröße und Ökoeffizienz völlig neu ausgelegt werden muss. Dies kann auch bedeuten, Randfälle des Betriebsspektrums stärker zu gewichten, um eine flexibel gewählte klimafreundliche Routenführung zu ermöglichen. Es ist demzufolge erforderlich, eine disziplin-übergreifende Integration aller Einzeltechnologien im Flugzeugentwurf vorzunehmen, um die einzelnen Vorteile zu einem Gesamtvorteil in zweistelliger Prozentzahl für das Flugzeug zu entwickeln. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass Verbesserungen in der aerodynamischen Güte und im Systemleichtbau neben dem Triebwerk wesentliche „Enabler“ für einen kraftstoff-effizienten und wirtschaftlichen Betrieb klimaneutraler Flugzeuge sind.

Die aktuelle Flugzeugflotte wird erst in zwanzig bis dreißig Jahren von einer neuen Generation abgelöst. Auf der einen Seite müssen daher derzeitige Flugzeuge, die bereits über einen sehr hohen Reifegrad



Morphing wing und Laminarhaltung



Triebwerksintegration

verfügen, mit Retro-fit-Lösungen verbessert werden – zum Beispiel werden im DLR-Projekt Low Noise ATRA Umbauten zur Lärmreduktion untersucht –, während darüber hinaus zusätzliche Investitionen in neue radikale Technologien fließen müssen. Da diese Entwicklungen parallel laufen müssen, resultiert daraus ein deutlich aufwändigeres R&T als bisher.

Die Herausforderungen der Integration neuer Technologien in den Flugzeugentwurf wurden im Kapitel 3 Elektrisches Fliegen in Hinblick auf die Forschung zu den unterschiedlichen Antriebslösungen bereits aufgeführt. Der Vollständigkeit halber werden sie an dieser Stelle komprimiert zusammengefasst.

Ein Vorteil von Konzepten mit elektrischen Motoren liegt in der Möglichkeit, auf Konfigurationsebene die Antriebe am Flugzeug zu verteilen. Die Verfügbarkeit von elektrischer Antriebsenergie ermöglicht damit die Integration der neuartigen aerodynamischen Technologie in neue Flugzeuge. Zusätzlich können synergetische Effekte, wie zum Beispiel eine günstige Verteilung der Masse, Modularität oder Superredundanz genutzt werden, um die Effizienz von Flugzeugen weiter zu verbessern.

Batterie-elektrische Antriebskonzepte limitieren die Flugzeuggröße und die Reichweite eines voll elektrischen Flugs in absehbarer Zukunft. Die geringe Energiedichte der Batterie führt zu einem hohen Leermassenanteil. Insbesondere die energetischen Reserven für Ausweichflug, Warteschleifen und Eventualitäten können sich für das Gesamtflugzeug dimensionierend auswirken. Eine Antriebssystemarchitektur bestehend aus Batterie, Regler und Elektromotor hat aufgrund der hohen Wirkungsgrade dabei eine schwer zu übertreffende Gesamtantriebseffizienz bei gleichzeitig geringer Systemkomplexität. Um die Nachteile bei der großen Betriebsleermasse flugzeugseitig zu begrenzen, können Reserven in Form von flüssigen Energieträgern mitgeführt werden. Die dafür benötigte Verbren-

nungsmaschine sorgt allerdings für einen höheren Komplexitätsgrad als im reinen batterie-elektrischen Flugzeug. Dies ist bereits eine spezielle Form von hybrid-elektrischen Flugzeugen.

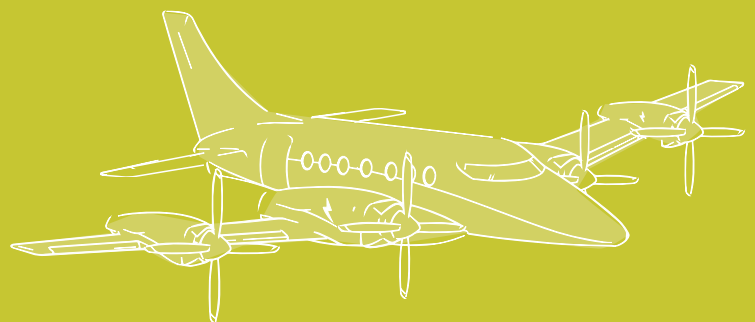
Im Vergleich zu Kerosin oder synthetischen Kraftstoffen hat Wasserstoff eine höhere Energiedichte. Bei gleichem Energiegehalt hat er als Kraftstoff demnach eine geringere Masse. Die Änderung der Flugzeugmasse während eines Fluges ist deutlich geringer, sodass der Unterschied zwischen Abflugmasse und Landemasse deutlich kleiner ist.

Bei der Auslegung von entsprechenden Flugzeugkonfigurationen ist daher ein entsprechendes Hochauftriebssystem zu berücksichtigen. Ein Nachteil ist jedoch die Energiespeicherung, die derzeit ein großes Volumen benötigt, um den Wasserstoff unterzubringen. Das muss konfigurativ berücksichtigt werden. Die umspülte Oberfläche des Gesamtflugzeugs nimmt dadurch zu, sodass der aerodynamische Widerstand ansteigt und die aerodynamische Effizienz verringert wird. Die Betriebsleermasse ist zudem durch Wasserstofftanks stark beeinflusst, sodass die Flugleistungen auch hiervon abhängig sind. Der Wirkungsgrad des Antriebssystems beeinflusst die Konfiguration im besonderen Maße. Brennstoffzellen weisen eine relativ geringe Leistungsdichte auf, wodurch Flugeschwindigkeit und sinnvolle Reichweiten begrenzt sein können.

Für Gasturbinen mit Wasserstoffverbrennung gelten dieselben konfigurativen Auswirkungen wie bei der Brennstoffzelle hinsichtlich des Energieträgers und der Speicherung der Energie. Flugzeuge mit hoher Reichweitenforderung (Mittel- und Langstreckenflugzeuge) benötigen ein entsprechend großes Volumen zur Unterbringung des flüssigen Wasserstoffs. Hierdurch ist mit Leistungseinbußen aufgrund des größeren aerodynamischen Widerstands und der höheren Strukturmasse zu rechnen.



Elektrisches Regionalflugzeug mit verteilten Antrieben



Batterie-elektrischer 19-Sitzer transportiert synthetischen Kraftstoff und eine Gasturbine als Reserve

## 6.2. TECHNOLOGIEFOLGENABSCHÄTZUNG IM GESAMTEN FLUGZEUG-LEBENSZYKLUS

Für eine ganzheitliche ökonomische und ökologische Lebenszyklusbewertung bedarf es entsprechender digitaler Methoden und Modelle, um die Auswirkungen des Technologieeinsatzes messbar zu machen. Dabei müssen die infrastrukturellen Anforderungen für den Betrieb aus den gewählten Systemarchitekturen der Flugzeuge hinsichtlich des Reifegrades, der Umweltwirkung als auch Kosten über den Lebenszyklus modelliert und untersucht werden.

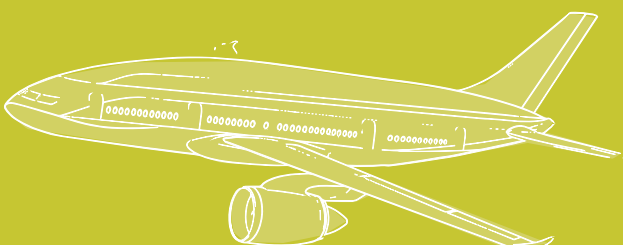
### ENTWICKLUNG VON METHODEN UND MODELLEN

Hierfür kann bereits auf existierende Modelle zurückgegriffen werden (zum Beispiel zur Ermittlung der Klimawirkung). Allerdings müssen die bestehenden Modelle für die neuen Flugzeugkonzepte erheblich erweitert werden. Hierzu zählen zum Beispiel grundlegende atmosphärenphysikalische Fragestellungen, die geklärt werden müssen, wie etwa das Bildungskriterium für Kondensstreifen und Eigenschaften von Kondensstreifen eines mit synthetischem Kerosin oder mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugs. Darüber hinaus müssen grundlegend neue Methoden zur Abschätzung der technologischen Auswirkungen entwickelt werden, beispielsweise für die Instandhaltungskosten. Neben der Betrachtung der Auswirkungen in einzelnen Bereichen sind für die gesamtheitliche Betrachtung die Verschaltung, der Transfer und die Interaktion der Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle über den Lebenszyklus entscheidend, um letztlich eine Aussage über die Nachhaltigkeit der angewandten Technologien zu erhalten. Da die Ergebnisse aus den technischen, ökonomischen und ökologischen Analysen nicht immer aufeinander abgestimmt sind, ist die Überführung in eine ganzheitliche Bewertung notwendig.

### DER ÖKONOMISCHE LEBENSZYKLUS: DIE ENTWICKLUNG VON KOSTEN- UND ERLÖS-MODELLEN

Mit Bezug auf den ökonomischen Lebenszyklus scheint sich eine Reihe möglicher Vor- und Nachteile abzuzeichnen. Eine wesentliche Eigenschaft des elektrischen Fliegens ist der Verzicht oder im Falle des hybrid-elektrischen Fliegens die Reduktion des Einsatzes von Brennstoffen. Da die Kraftstoffkosten einen signifikanten Anteil an den Betriebskosten darstellen, ist ein großer wirtschaftlicher Einfluss auf die Fluggesellschaften durch die Wahl des Energieträgers zu erwarten. Die Entwicklung des Energiemarktes ist für die Bewertung der ökonomischen und ökologischen Vorteile des elektrischen Fliegens ein entscheidender Faktor. In Bezug auf die Betriebskosten ist die Preisentwicklung für fossiles Kerosin, synthetisches Kerosin, Wasserstoff und Strom sowie deren Besteuerung der wesentliche Treiber für die Einführung der jeweiligen Technologie. Hier müssen auch transportmodus-übergreifende Energieszenarien entwickelt werden. Sensitivitätsanalysen können dann dabei unterstützen, ein besseres Systemverständnis aufzubauen und die zukünftige Entwicklung von Kraftstoff- und Strompreisen, Wirkungsgraden, Speicherkosten und damit der Wirtschaftlichkeit des Flugzeugs abzuschätzen.

In Ergänzung zu den Kostenmodellen müssen auch neuartige Erlösmodelle für Kosten-Nutzen-Analysen untersucht und erstellt werden. Zum einen gilt es, den Einfluss der Passagierakzeptanz hinsichtlich der Preisentwicklung unter dem Einfluss der Technologie und des Betriebsumfeldes wie Energiekosten und regulatoriver Maßnahmen zu analysieren. Zum anderen gilt es, Auswirkungen von abweichenden Flugzeuanforderungen zum heutigen Referenzsystem abbilden zu können. Dazu zählt zum Beispiel die Untersuchung des Einflusses einer langsameren Fluggeschwindigkeit auf die Passagiernachfrage. Gleichmaßen gilt es, daraus entstehende Implikationen auf die Netz-, Flotten- und Umlaufplanung zu identifizieren und zu bewerten. Diese Informationen gilt es dann, in die Instandhaltungsplanung, aber auch auf die ökologische Analyse zur Ermittlung der Klimawirkung der Flugzeugflotte zu transferieren.



Gasturbinen, die synthetische Kraftstoffe verbrennen, ermöglichen einen schnellen Reiseflug. Brennstoffzellen werden für den Rollverkehr am Boden genutzt. Beide Systeme parallel eingesetzt erzeugen maximale Energie für den Start



Beispiel einer Gesamtbewertung des Flugzeugdesigns





Entwicklung und Validierung verbesserter Multi-Material-Produktionstechnologie

Die Untersuchungen zu ökonomischen Implikationen in der Produktion von batterie-elektrischen, turbo-hybrid-elektrischen, Brennstoffzellenantrieben oder mit Wasserstoff angetriebenen Flugzeugen müssen zum einen der Flugzeugproduktion selber als auch der Bereitstellung von Energieträgern beziehungsweise Energiespeichern Rechnung tragen. Da es sich um Komponenten handelt, die ihren Einsatz erst zukünftig finden, müssen für die Kostenabschätzungen entsprechende Methoden und Modelle abgeleitet werden.

Nachdem das Flugzeug oder seine Komponenten das Ende der Lebensdauer erreicht haben, müssen diese entsorgt oder recycelt werden. Dies hat wirtschaftliche Auswirkungen, da Kosten durch die notwendige Entsorgung bestimmter Materialien oder Komponenten verursacht werden. Jedoch besteht auch die Möglichkeit, ausgewählte Materialien und Komponenten zu recyceln und in selbigen oder in anderen Lebenszyklen wiederzuverwenden, was den Restwert des Flugzeugs am Ende seiner Nutzungsdauer erhöht. Dementsprechend gilt es zu analysieren, welche Komponenten der betrachteten Flugzeugkonzepte entsorgt oder recycelt werden können und welche End-of-Life-Szenarien damit verbunden sind. Diese werden dann zur Berechnung der End-of-Life-Kosten herangezogen.

#### **DER ÖKOLOGISCHE LEBENSZYKLUS: ANALYSE DER UMWELTAUSWIRKUNGEN**

Auch in der ökologischen Betrachtung ist eine systematische und durchgängige Analyse der Umweltwirkungen wie Klimaeffekte und

Lärm von neuartigen Flugzeugen auf Basis von ausgewählten Leistungsindikatoren während des gesamten Lebensweges anzustreben. Dabei gilt es, neben den Effekten des reinen Flugzeugbetriebs auch die Lebensphasen der Produktion und der Entsorgung in die Analysen und die Bilanzierung einzubeziehen. Dadurch soll identifiziert werden, welches Nachhaltigkeitspotenzial sich durch den Einsatz elektrischer oder hybrid-elektrischer Flugzeuge im Vergleich zu konventionellen Flugzeuge oder dem Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe wie Wasserstoff oder Drop-in-Kraftstoffe ergibt. Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus ist von daher essenziell, als dass die in Zukunft angewandten Flugzeugkonfigurationen im Sinn einer Ökobilanzierung die bestmöglichen Lösungen darstellen und das Potenzial für einen möglichst geringen ökologischen Fußabdruck besitzen.

Generell ist bei der Bewertung der ökologischen Bilanz die Frage der Energieerzeugung relevant. Um eine wirkliche Emissionsneutralität zu erreichen, muss das synthetische Kerosin, der Strom oder der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien gewonnen werden. In diesem Fall sind für die Bewertung der Klimawirkung des reinen Flugbetriebs die zu verwendenden Hintergrundszenerien entsprechend dem Energie-Mix anzupassen. Das heißt, neben den direkten Emissionen, welche durch den Betrieb von neuartigen Flugzeugen entstehen, sind auch indirekte Emissionen und Umweltwirkungen durch die Herstellung der Energieträger zu berücksichtigen. Dazu zählt auch der Austausch verschiedener Komponenten während der Lebensdauer des Flugzeugs, wie zum Beispiel Batterien, Brennstoffzellen oder Wasserstoff-

.....

*„Für eine ganzheitliche ökonomische und ökologische Lebenszyklusbewertung bedarf es entsprechender digitaler Methoden und Modelle, um die Auswirkungen des Technologieeinsatzes messbar zu machen.“*

.....

speicher. In einer Studie zur Ökoeffizienz eines Airbus A320 wurde festgestellt, dass der Betrieb mit 99,9 % den größten Beitrag zur Gesamtumweltbelastung des Flugzeugs leistet, wobei die Kerosinverbrennung hier den größten Teil der Emissionen verursacht. In der Herstellungsphase des A320 tragen die Tragflächen- und Triebwerkskomponenten zu 63 % zur Umweltbelastung bei, während CFK-Material 10 % des gesamten Materialanteils ausmacht, jedoch zu 45 % zu der Herstellungsbelastung beiträgt.

Neben der Bewertung der Klimawirkungen durch den direkten Flugbetrieb, gilt es für die Klimabewertung geeignete Bewertungsarchitekturen für die zu erforschenden Technologien aufzubauen. Grundlage für die Klimabewertung bilden räumliche Emissionsverteilungen, die unter Verwendung von Emissionskatastermodellen berechnet werden können. Hierfür müssen hinsichtlich der Klimabewertung theoretische Grundlagen für Emissionsverhalten erarbeitet und die angewandten Klimamodelle für die zu betrachtenden Technologien angepasst werden. Darauf aufbauend können dann für jeden Flug individuelle Trajektorien geplant werden. Dies hat Auswirkungen auf das Air Traffic Management und erfordert insbesondere auf langen Strecken neue Air Traffic Control-Konzepte.

Für die ökologischen Analysen im Bereich der Produktion sind neben der Zelle auch das Antriebssystem und die Energiespeicher zu bilanzieren. Als Grundlage dazu dienen Energie- und Materialflüsse, die gleichermaßen für die ökonomische Analyse herangezogen werden

können. Im Fall des Betriebs mit Batterien ist die erforderliche Batterieanzahl über den Lebenszyklus zu ermitteln und in die Ökobilanz zu integrieren. Die gerade genannten Aspekte sind gleichermaßen bei der Außerdienststellung des Flugzeugs selber als auch dazugehöriger Systemkomponenten (zum Beispiel Entsorgung von Batterien) von hoher Relevanz.

# DIE TRANSFOR- MATION DER LUFTFAHRT- INDUSTRIE

7





Ein Technologiewandel in der Luftfahrt ist ein langwieriger und kostenintensiver Prozess, der hohe Investitionen in die Forschung und Entwicklung sowie in die Zulassung verlangt und eine konstante politische Unterstützung erfordert. Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Luftfahrt liegen viele Herausforderungen, die nur in Zusammenarbeit von Forschung und Industrie lösbar sind. Doch der Einsatz von nachhaltigen Kraftstoffen in Verbindung mit neuen Luftfahrtstrukturen, moderner Triebwerkstechnologie, alternativen Antriebslösungen sowie Energieträgern wie Wasserstoff eröffnen zahlreiche Möglichkeiten für einen umweltschonenden Luftverkehr von morgen.

## 7.1. HUBSCHRAUBER

Im globalen Luftverkehr haben Hubschrauber einen deutlich geringeren Anteil am CO<sub>2</sub>-Ausstoß als der dominierende Sektor der Verkehrsflugzeuge. Dennoch können zukünftige Hubschrauber und

sogenannte VTOL (Vertical Take-Off and Landing)-Luftfahrzeuge eine signifikante Verringerung der Gasemissionen erzielen und somit zur Verbesserung des Klimas, vor allem in ihrem Einsatz im innerstädtischen Bereich beitragen (zum Beispiel bei Luftrettung, polizeilichen Aufgaben, Personentransport).

Darüber hinaus stellt das emissionsfreie Fliegen bereits heute eine wesentliche Anforderung für das potenzielle Wachstum des neuen Marktsegments der Urban Air Mobility (UAM) dar, welches bei einem nicht vertretbaren Umwelteinfluss kaum akzeptiert werden wird.

Die deutsche Hubschrauberindustrie hat hierzu einen Forschungs- & Technologiefahrplan etabliert, welcher den Weg zum emissionsfreien Fliegen beschreibt. Dieser Plan verfolgt zum einen die Entwicklung erforderlicher Technologiebausteine, vornehmlich im Bereich der Antriebe, Rotoren und neuartiger Strukturbauteile, und zum anderen deren Integration und Erprobung in realem Umfeld (Flugdemonstratoren). Hierbei werden sowohl hybride als auch voll-elektrische Antriebskonzepte berücksichtigt, welche sich für unterschiedliche Plattformen im Bereich der konventionellen Hubschrauber sowie der VTOLs für UAM eignen.

## 7.2. KLEINFLUGZEUGE UND URBAN AIR MOBILITY

Vollelektrisches und zunehmend autonomes Fliegen bietet eine Möglichkeit für den schnellen, emissionsarmen Personentransport in urbanen Räumen oder zwischen benachbarten Städten.

Derartige Flugtaxi könnten darüber hinaus beispielsweise im Rettungsdienst ergänzend eingesetzt werden, um Notärzte schnell zum Unfallort zu transportieren. Der Krankentransport selbst bleibt jedoch aufgrund der hohen Nutzlastanforderungen in absehbarer Zeit klassischen Hubschraubern vorbehalten. Hier geht der Trend eher in Richtung größerer, leistungsfähigerer Hubschrauber mit verbesserter Patientenversorgung schon in der Luft.

Ein weiterer Trend geht mit der Entwicklung von unbemannten Luftfahrtsystemen (UAS) einher, die im zivilen Bereich an der Schwelle stehen, eine große Bedeutung zu erlangen. Technologische Fortschritte ermöglichen aktuell die Entstehung einer neuen Industrie im Bereich der unbemannten Systeme, aber auch neuartiger fliegender

.....

*„Der Einsatz von nachhaltigen Kraftstoffen in Verbindung mit neuen Luftfahrtstrukturen, moderner Triebwerkstechnologie, alternativen Antriebslösungen sowie Energieträgern wie Wasserstoff eröffnen zahlreiche Möglichkeiten für den klimaneutralen Luftverkehr von morgen.“*

.....

Transportmedien für urbane Ballungszentren und deren Verbindung. Es zeichnet sich derzeit eine deutlich höhere Innovationsgeschwindigkeit in der Luftfahrtindustrie ab.

Erste Anwendungen unbemannter Luftfahrzeuge sind die Versorgung schlecht angebundener Gebiete und die Lieferung dringend benötigter Güter wie etwa Medikamente sowie die Unterstützung von Einsatzkräften bei der Katastrophenhilfe. Auch ein Austausch eilig benötigter Produktionsteile zwischen Industriestandorten ist denkbar. Durch den Einsatz von unbemannten Logistiklösungen werden insbesondere in Ballungsräumen herkömmliche Lieferfahrzeuge wie zum Beispiel Lkws reduziert. Da kleine unbemannte Luftfahrtsysteme vorwiegend elektrisch angetrieben werden, wirkt sich ihr Einsatz auf eine bessere Luftqualität insbesondere in Städten aus. Erste Prototypen-Luftfahrzeuge lassen einen Blick auf die urbane Luftmobilität der Zukunft zu. Allerdings weisen aktuelle UAS-Konzepte große Unterschiede auf. Im nächsten Schritt müssen die Konzepte hinsichtlich ihrer Tauglichkeit und Realisierbarkeit bewertet werden. Während sich in der Vergangenheit die weltweite Erprobung von UAS auf eine überschaubare Anzahl an Tests beschränkte, wird sich aufgrund des rasanten Wachstums der gesamten Branche auch die Zahl der Systemerprobungen deutlich erhöhen müssen, um eine ganzheitliche Technologieentwicklung zu ermöglichen.

### **7.3. REGIONALFLUGZEUGE**

Die Umstellung auf einen rein elektrischen Antrieb in der Luftfahrt kann in bestimmten Bereichen zum umweltfreundlichen Luftverkehr beitragen, denn batterie-elektrische Antriebe sind die derzeit einzige Antriebstechnologie, die völlig ohne Emissionen am Flugzeug aus-

kommt. Bei einem voll-elektrischen Antriebskonzept werden die Gasturbine und das Kerosin durch einen Elektromotor mit Batterie und entsprechender Leistungselektronik ersetzt. Im kommerziell erfolgreichen Betrieb sind batterie-elektrisch angetriebene Flugzeuge von einer Reichweite bis zu 300 km in naher Zukunft realisierbar. Sie eignen sich besonders für Reisen innerhalb von Ballungsräumen oder als Zubringerflugzeuge, da die geringe Energiedichte die Reichweite stark limitiert.

### **7.4. KURZSTRECKE**

Perspektivisch werden heutige Flugzeuge auf der Kurzstrecke von neuen Luftfahrzeugen mit hybriden Antriebskonzepten abgelöst, die reduzierte Schadstoffemissionen versprechen. Darüber hinaus punkten sie durch eine größere Reichweite als rein batterie-elektrische Antriebslösungen. Hybride Antriebskonzepte mit Turbinen erzeugen zwar dieselben Emissionen wie ein Turbinenantrieb, allerdings können die Gasturbinen für die elektrische Energieversorgung und das Flugzeug besser optimiert werden, sodass mit einer kleinen Verringerung der Emissionen gerechnet werden kann – vorausgesetzt, das Mehrgewicht wirkt sich nicht negativ aus. Bei reinem Batteriebetrieb ist im Flughafenbereich oder auf sehr kurzen Flugstrecken ein emissionsfreier Betrieb möglich. Antriebsarchitekturen mit Brennstoffzellen bergen großes Potenzial, denn sie erzeugen ausschließlich Wasserdampf als Abgas. Das heißt, Ruß, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> werden komplett vermieden. Die Auswirkungen des verbleibenden Wasserdampfs können außerdem durch eine klimafreundliche Routenwahl minimiert werden. Außerdem könnte eine Kondensstreifenbildung aufgrund von geringer Abgastemperatur vermieden werden. Untersuchungen dazu stehen noch aus.

Unabhängig von der Kombination von Energieträger und Antriebskonzept versprechen turbo-hybrid-elektrische und Brennstoffzellen-Konzepte eine größere Reichweite gegenüber batterie-elektrisch angetriebenen Flugzeugen. Aus heutiger Sicht hat die Brennstoffzelle in Verbindung mit grünem Wasserstoff langfristig das Potenzial, ausreichende Leistung und Reichweite für die kommerzielle Luftfahrt bereitzustellen. Am Flughafen könnte emissionsfreier Luftverkehr mit Flugzeugen für rund 120 Passagiere und Reichweiten von etwa 2.000 km kurzfristig realisiert werden.

## 7.5. MITTEL- UND LANGSTRECKE

Nachhaltige Luftfahrt-Kraftstoffe werden in den kommenden Jahren als Drop-in-Konzept eine wichtige Technologie für einen umweltverträglichen Luftverkehr darstellen. Kraftstoffe mit der Beimischung alternativer Kraftstoffe können bereits heute als Drop-in-Kraftstoffe in allen Flugzeugen und Infrastrukturen ohne Einschränkung und Modi-

fikation exakt wie konventionelle Kraftstoffe genutzt werden. Gemessen auf die bestehende globale Flotte, besteht hier ein erhebliches Potenzial klimaschädliche Effekte zu minimieren, denn es können sowohl CO<sub>2</sub>-Effekte als auch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte reduziert werden. Bereits heute werden alternative Kraftstoffe auf kommerziellen Flügen als Drop-in-Kraftstoffe eingesetzt. Allerdings liegen die Mengen aktuell noch bei unter 1 % des weltweiten Verbrauchs. Langfristig wird Wasserstoff eine zunehmend wichtigere Rolle spielen, um die Umwelteinflüsse zu reduzieren. Wasserstoff ist besonders vielversprechend, da er eine hohe Energiedichte besitzt und vollständig regenerativ aus erneuerbaren Energien gewonnen werden kann. In Zukunft ist auch der Einsatz von turbo-hybrid-elektrischen und Brennstoffzellen-Antriebskonzepten auf der Mittel- und Langstrecke denkbar. Aufgrund des geringen Reifegrades sind jedoch noch erhebliche Investitionen und Forschung in den Bereichen Energiespeicher und Antriebsstrang, Vehikel und Gesamtentwurf sowie Transportsystem und Betrieb notwendig.

### DER WEG ZU EINER KLIMANEUTRALEN LUFTFAHRT DER ZUKUNFT

			Kurzfristig 2035	Langfristig > 2050
Urban Air Mobility	Passagiere	~ 4	Batterie-elektrischer Antrieb Turbo-hybrid-elektrischer Antrieb	Batterie-elektrischer Antrieb
	Reichweite	0–100 km		
Commuter	Passagiere	6–19	Brennstoffzellenantriebssystem Alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	Turbo-hybrid-elektrischer Antrieb
	Reichweite	50–600 km		
Regional	Passagiere	20–120	Turbo-hybrid-elektrischer Antrieb Neue thermische Turbomaschinen	Brennstoffzellenantriebssystem Alternative Kraftstoffe > Wasserstoff
	Reichweite	500–2.000 km		
Kurzstrecke	Passagiere	100–200	Alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	Neue thermische Turbomaschinen
	Reichweite	1.000–4.000 km		
Mittelstrecke	Passagiere	180–300	Alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	Neue thermische Turbomaschinen
	Reichweite	2.000–8.500 km		
Langstrecke	Passagiere	> 200	Alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	
	Reichweite	5.000–18.000 km		

# FORSCHUNGS- UND TECHNO- LOGIEBEDARF

8



Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, lassen sich die Technologien, die weiterentwickelt werden müssen, wie folgt gruppieren: Umweltwirkung, neue Wärmekraftmaschinen, elektrisches Fliegen, Wasserstoff, alternative Kraftstoffe, neue Flugzeugkonzepte und -strukturen, optimierte Komponenten und Flugführung. Die verschiedenen Technologien sind am besten geeignet für entsprechende Zielprodukte. Wie nachfolgend beschrieben, können diese Themen aufgrund ihrer unterschiedlichen Charakteristika und Anforderungen am besten regional, national oder international angegangen werden.

## 8.1. REGIONALE MASSNAHMEN

Der Bericht der Koordinatorin für die Deutsche Luft- und Raumfahrt 2017 unterstreicht die rasante Entwicklung des Marktes für das zivile unbemannte Fliegen in den letzten Jahren.

Im Rahmen der europäischen Innovationspartnerschaft „Smart Cities and Communities“ hat die Bundesregierung fünf Urban Air Initiativen als Modellstädte beziehungsweise Modellregionen auserkoren: Aachen, Hamburg, Ingolstadt, Münster und Nordhessen. Diese Initiativen betrachten das Thema Mobilitätskonzepte sowohl hinsichtlich Flugtaxis als auch andere Anwendungsformen von UAS. Sie konzentrieren sich dabei insbesondere auf die jeweiligen regionalen Besonderheiten hinsichtlich Eignung und Bedarf an UAS-Anwendungen. Als neue Mobilitätsform spielt der Personentransport mit Flugtaxis eine große Rolle für die Städte und Regionen. Damit aber eines Tages Flugtaxis in unseren Städten fliegen können, müssen einige Herausforderungen bewältigt werden. Denn neben der Entwicklung neuer Flugsysteme – also dem eigentlichen Vehikel – müssen neue Infrastrukturen sowie Verkehrs- und Dienstleistungsmodelle geschaffen werden.

Es ist der Trend erkennbar, dass die Forschung am fliegenden System selbst hauptsächlich von Start-ups betrieben wird. Für die Umsetzung und den kommerziellen Betrieb braucht es jedoch große Player und Luftfahrt-OEMs. Dieses Wachstum geht mit der Entwicklung neuer Konzepte, Technologien und Herausforderungen einher. Daher sieht die Industrie einen immer größeren Bedarf an neuen Erprobungsverfahren. Denn während sich in der Vergangenheit die internationale Erprobung von UAS auf eine überschaubare Anzahl an Tests beschränkte, wird sich aufgrund des rasanten Wachstums der gesamten Branche auch die Zahl der Systemerprobungen drastisch erhöhen müssen. Nur so ist eine ganzheitliche Technologieentwicklung möglich. Daraus ergibt sich ein Bedarf an neuen Erprobungsverfahren und -möglichkeiten, die bisher in der benötigten Form nicht existieren.

Das DLR hält für die Auslegung und Vorentwicklung von UAS umfassende Simulationsumgebungen bereit und baut darüber hinaus seit 2018 das Nationale Erprobungszentrum für Unbemannte Luftfahrtsysteme in Cochstedt auf. Mit dem Nationalen Erprobungszentrum entsteht in Deutschland ein einmaliges Testumfeld, welches sowohl der Forschung als auch der Industrie erlaubt, in einem speziell geschaffenen Umfeld die UAS-Technologien umfassend und sicher zu validieren. Um die erwartete Nachfrage nach Realtestumgebungen zukünftig decken zu können, werden deutschlandweit mehrere solcher sogenannten Testfelder notwendig sein. Um die Fülle aller zukünftigen Testfeldaktivitäten sinnvoll koordinieren zu können, werden diese in einem Netzwerk gebündelt, in dem das DLR mit seinem Nationalen Erprobungszentrum für Unbemannte Luftfahrtsysteme eine zentrale, integrative Rolle einnimmt.

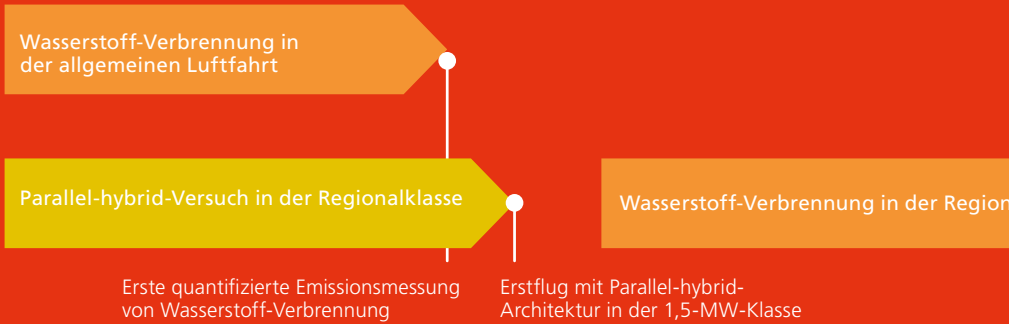
# DEMONSTRATORENPLAN FÜR DIE ENTWICKLUNG VON TECHNOLOGIEN FÜR EINEN UMWELTSCHONENDEN LUFTVERKEHR

DLR-INITIATIVEN

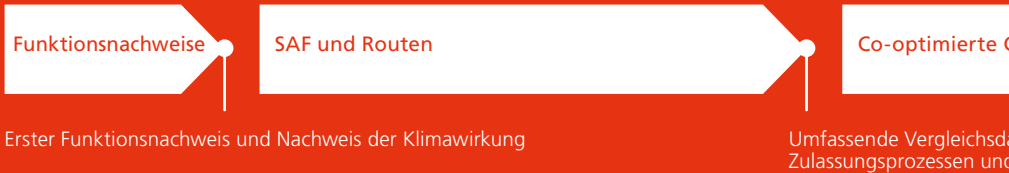
## H2HEP: Modularer Erprobungsträger für hybrid-elektrische Architekturen



## H2Atmo: Reallabor zur Wasserstoffverbrennung unter realen Flugbedingungen

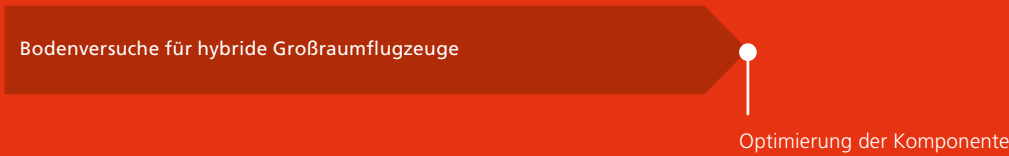


## SAFinFlight: Alternative Near-Drop-in-Kraftstoffe in der klassischen Gasturbine

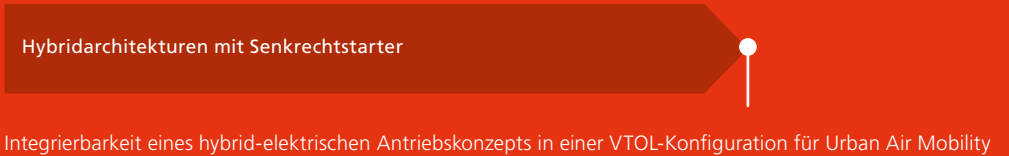


INDUSTRIE

## H2EnergyBird: Bodenversuche für hybride Großraumflugzeuge



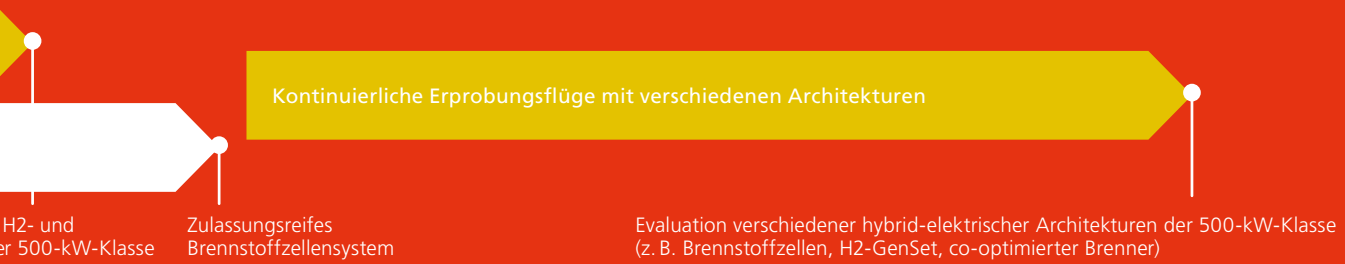
## H2Urban: Wasserstoff-Hybridarchitekturen im Bereich Urban Air Mobility



Jahr 2020 2025

E-Fliegen Wasserstoff Brennstoffzellen SAFs und Routen





2030

Während Bayern sein Investitionsprogramm aufstockt und bis 2023 2 Mrd. Euro in Wissenschaft und Forschung und dabei auch in unbemanntes Fliegen einsetzen möchte, investiert die Bundesregierung in die ehemaligen Kohleabbaugebieten Nordrhein-Westfalen, Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt. NRW profitiert von 2,6 Mrd. Euro, Brandenburg von 1,9 Mrd. Euro, Sachsen von 1,8 Mrd. Euro und Sachsen-Anhalt von rund 1 Mrd. Euro. Die Bundesregierung investiert in diesen Regionen in Technologieforschung zur Erschließung und Etablierung neuer Industrieformen, die allesamt auf die Umwelt und ein besseres Klima einzahlen sollen. In diesen Regionen wäre ein Strukturwandel hin zu neuen Industriezweigen wie unbemanntes Fliegen denkbar.

## 8.2. DAS LUFTFAHRTFORSCHUNGSPROGRAMM (LUFO)

Die Forschung innerhalb des Luftfahrtforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) zur Stärkung der deutschen Luftfahrtindustrie wird in den kommenden Jahren unter anderem die Weiterentwicklung von Zukunftstechnologien wie neue Wärmekraftmaschinen, hybrid-elektrische Flugzeuge und Wasserstofftechnologien vorantreiben. Die ganzheitliche Betrachtung der Digitalisierung der Luftfahrt im Zusammenhang mit klimafreundlichem Fliegen erhält dabei immer mehr Bedeutung.

In der Debatte um klimafreundliches Fliegen und digitalen Wandel darf nicht nur das Luftfahrzeug an sich, sondern es müssen gleichzeitig die vorangehenden Produktionsprozesse und Materialien betrachtet werden. Die zu bewältigenden Herausforderungen für zukünftige Flugzeuge, beziehen sich auf eine hohe Anpassungsfähigkeit auf Kundenbedarfe, eine effiziente Ratenhochlaufbarkeit und eine komplexe globale, nachhaltige Lieferkette – unabhängig davon, ob es sich um das Antriebssystem, die Kabine oder die Struktur handelt. Brennstoffzellen könnten aufgrund der Energiedichte von Wasserstoff zu den Energielieferanten für Langstreckenflugzeuge weiterentwickelt werden. Um dies zu erreichen, sollten jedoch zunächst die Funktionalität, Risiken und Sicherheit in kleineren Flugzeugklassen

getestet werden. Einige Aspekte wie der Wirkungsgrad des Antriebssystems beeinflussen die Konfiguration im besonderen Maße und müssen daher weiter untersucht werden. Brennstoffzellen weisen eine relativ geringe Leistungsdichte auf, wodurch Fluggeschwindigkeit und sinnvolle Reichweiten begrenzt sein können. Insbesondere wegen der geringen Arbeitstemperatur von Niedertemperatur-Brennstoffzellen stellt die Kühlung nicht nur eine technologische Herausforderung dar, sondern bedeutet auf Flugzeugebene möglicherweise eine signifikante Leistungseinbuße.

Weiterentwicklungen auf dem Gebiet des Systemleichtbaus können diese Leistungseinbußen zum Teil kompensieren.

### EMPFEHLUNG: FLUGDEMONSTRATOR WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLE IN DER ZUBRINGERKLASSE

Alle diese Eigenschaften könnten durch einen Flugdemonstrator optimal erforscht werden – ein Flugdemonstrator mit Brennstoffzellen in der Zubringerklasse von rund 500 kW. Das wäre der Erstflug eines Brennstoffzellenantriebs der 500-kW-Klasse. Mithilfe dieses Demonstrators wäre die Forschung zur Integration solcher Komponenten in das Flugzeug inklusive Kühlung, Leistungsverteilung, neuer Strukturkonzepte und Zulassung möglich, mit dem Ziel ein zulassungsreifes Brennstoffzellensystem für 500-kW-Antriebe zu erreichen. Während die Forschung den Demonstrator weiterhin als Erprobungsträger nutzt, könnte die Industrie sich auf die Entwicklung eines größeren Produkts konzentrieren.

Brennstoffzellensysteme werden auch unter dem Gesichtspunkt ihrer möglichen Skalierung untersucht. Dafür bedarf es jedoch weiterer Forschungsanstrengungen im Bereich Leistungsdichte und Kühlung. Dafür sind die Entwicklung und Erprobung sowie Integrationslösungen für Kühlungskonzepte für Brennstoffzellensysteme im MW-Bereich erforderlich.

Andere interessante Projekte im Rahmen von LuFo wären unter anderem das Monitoring der lokalen Luftqualität, um die Effekte von der Verbrennung und deren Auswirkung auf die menschliche Gesundheit besser zu verstehen. So könnten Messverfahren untersucht werden, um eine Basis für zukünftige Messstandards zu erarbeiten.

.....

*„In der Debatte um klimafreundliches Fliegen und digitalen Wandel darf nicht nur das Luftfahrzeug an sich, sondern es müssen gleichzeitig die vorangehenden Produktionsprozesse und Materialien betrachtet werden.“*

.....

Kraftstoffauswirkungen sind komplex und betreffen verschiedene Fachdisziplinen und Industriezweige. Für die umfassende Bewertung und Optimierung des Kraftstoff-Flugzeugsystems ist die Entwicklung einer digitalen Plattform zur interdisziplinären Zusammenarbeit notwendig. Dadurch wird die Verknüpfung zur Prozesssimulation und Kostenanalyse für eine umfassende Bewertungsplattform von der Erzeugung bis zur Nutzung alternativer Kraftstoffe ermöglicht. Außerdem sind eine techno-ökonomische und techno-ökologische Bewertung neuer Herstellungsverfahren sowie eine Kosten-Nutzen-Bewertung von Kraftstoffperformance gegenüber Herstellungsaufwand erforderlich. Auf Gesamtsystemebene muss der Einfluss auf die Kraftstoffinfrastruktur, Flugzeugperformance und Wartungszyklen erforscht werden, um die Kraftstoffeffekte auf die komplette Wertschöpfungskette in der Luftfahrtindustrie zu quantifizieren. Hindernis für eine Einführung in großen Mengen ist derzeit die Produktionskapazität. Wichtig sind Projekte zur Untersuchung der PtL-Herstellung (Power to Liquid) im semi-industriellen Maßstab, um die Herstellung vielversprechender Kraftstoffe zu analysieren und die Hochskalierung auf großindustriellen Maßstab zu berechnen.

Die Entwicklung und Untersuchung von Batteriesystemen für die Luftfahrtanwendung wird auch dazu führen, die Leistungsdichte zu maximieren, Kühlungslösungen zu analysieren und die Sicherheit durch mehr Redundanz und verbesserte Überwachung zu erhöhen.

LuFo wird auch Projekte zur Wasserstoffverbrennung fördern. Um die Wasserstoffverbrennung zu optimieren, wird ein Wasserstoffbrennkammersystem entwickelt und bis zu einer Flugdemonstration geführt. Zudem soll ein Brennkammersystem entwickelt werden, das die zuverlässige Verbrennung des Wasserstoffs erlaubt. Weitere Aspekte wie die Kraftstoffspeicherung, die Erhöhung der gravimetrischen Speicherdichte, die Regelung und Flugintegration werden untersucht, um zukünftig eine Emissionsoptimierung zu erreichen.

### 8.3. WEITERE MASSNAHMEN AUF NATIONALER EBENE

Der entscheidende Nachteil batterie-elektrischer Flugzeuge ist die geringe Energiedichte der Batterie. Das bedeutet, um viel Energie zu speichern, wird eine große Masse benötigt. Die maximale Speicherkapazität bezogen auf das Batteriegewicht beträgt heute 230 Wh/kg und liegt damit um etwa den Faktor 25 unter der von Kerosin mit 11.900 Wh/kg. Bereits für Regionalflugzeuge wäre eine Energiedichte von etwa 1.000 Wh/kg nötig. Batterie-betriebene Flugzeuge eignen sich daher auf absehbare Zeit nicht für energieintensive Anwendungen wie den Massentransport über weite Strecken. Sie eignen sich allerdings für Reisen innerhalb von Ballungsräumen oder Zubringerflugzeuge an Regionalflughäfen. Dennoch können Flugzeuge zukünftig so ausgelegt werden, dass ein signifikanter Anteil kurzer Missionen (bis ~ 800 km) voll-elektrisch mit Batterien als Energieträger erfolgt.

Ein wesentlicher Forschungsbedarf besteht, neben der Komponentenentwicklung, im Systemverständnis der verschiedenen hybrid-elektrischen Varianten. Um diese Fragestellungen zu beantworten, sind sowohl numerische Analysen als auch systematische experimentelle, real gekoppelte Untersuchungen auf geeigneten Prüfständen erforderlich.

#### EMPFEHLUNG: FLUGDEMONSTRATOR FÜR ELEKTRISCHE ANTRIEBSARCHITEKTUREN FÜR DIE KURZSTRECKE

Optimal wäre der Bau eines modularen Versuchsträgers, mit dem die entsprechenden Komponenten in realer Umgebung getestet werden könnten. Dafür wäre die Umrüstung eines Flugzeugs notwendig, um einen fliegenden Erprobungsträger für E-Komponenten in der 500-kW-Klasse zu entwickeln. Zunächst wäre eine batterie-elektrische Konfiguration denkbar, um danach über turbo-hybrid-elektrische Antriebe bis zu Brennstoffzellen-Antrieben zu gelangen. Damit wären Batterien, Elektronik, Motor, Regelung, Supraleitung und Brennstoffzellen optimiert, um die Komponenten und deren Integration gleichzeitig zu verbessern.

.....

*„Im Zuge der Umrüstung des Triebwerks eines Regionalflugzeugs für die Wasserstoffverbrennung könnten Flugversuche durchgeführt werden, die die Atmosphäreneinflüsse quantifizieren und die Effizienz der Technologie nachweisen.“*

.....

#### **EMPFEHLUNG: FLUGDEMONSTRATOR FÜR HYBRIDE ANTRIEBS-ARCHITEKTUREN IM URBAN AIR MOBILITY-BEREICH**

Der wachsende Mobilitätsbedarf kann mithilfe des unbemannten Fliegens ergänzt werden. Derartige Vehikel sind normalerweise Senkrechtstarter (VTOL) und batterie-elektrisch angetrieben. Dieses Antriebskonzept ermöglicht zwar emissionsfreies Fliegen, ist jedoch wegen des heutigen Technologiestands der Batterieleistung hinsichtlich Flugdauer und Reichweite beschränkt. Eine Alternative dazu wäre eine hybrid-elektrische Konfiguration, die aus Brennstoffzellen und Batterien besteht. Diese würden auf einer adaptiven VTOL-Plattform integriert und dadurch die spezifischen Integrationsaspekte bezüglich dieser Plattform adressiert. Die Leistung sollte im Flug untersucht werden, um die Verbesserung im Bereich Flugdauer und Reichweite in realer Umgebung zu bewerten und die potenziellen Risiken zu identifizieren.

#### **EMPFEHLUNG: FLUGDEMONSTRATOR FÜR HYBRIDANTRIEBE UND ZULASSUNG FÜR DAS SEKUNDÄRENERGIESYSTEM IN DER GROSSFLUGZEUGKLASSE**

Das erhebliche Potenzial des Wasserstoffs und der Brennstoffzellen wurde bereits angebracht. Die mögliche Nutzung der Brennstoffzellen ist aber nicht nur auf den Antrieb beschränkt, sondern auch für das Sekundärenergiesystem geeignet. Zu diesem Zweck sind aber weitere Untersuchungen nötig. Dafür wäre es wichtig, einen validierten Großflugzeug-Bodenprüfstand im Realmaßstab aufzubauen, womit unterschiedliche Brennstoffzellenapplikationen weiterentwickelt werden könnten. Damit würden gezielt der Antrieb am Boden, die Funktionen einer systemintegrierten Leichtbaustruktur, die Kabinenversorgung sowie leistungs- und gewichtsoptimierte dezentrale hydraulische Power Packs als Alternative zu den nicht mehr verfügbaren zentralen Hydraulik-Kreisen unter realen Bedingungen untersucht werden. So ein Demonstrator würde gleichzeitig die Möglichkeit bieten, die entsprechende Komponente zu optimieren. Die Ergebnisse würden die Basis vorbereiten, um zukünftig einen realskalierten Hybridantrieb, einschließlich der notwendig angepassten Leichtbaustruktur, für das Sekundärenergiesystem in der Großflugzeugklasse zu entwickeln. Die Auslegung und Zulassung derartiger Luftfahrtkonzepte wirft heute eine Vielzahl von Fragen auf, die oft nur beantwortet werden können, wenn das gekoppelte System aus Betrieb, Vehi-

kel und Antriebstechnologien gemeinsam betrachtet wird. So ein realskalierter Prototyp würde auch zur Klärung von Zulassungsfragen dienen.

#### **EMPFEHLUNG: FLUGDEMONSTRATOR FÜR WASSERSTOFFVERBRENNUNG FÜR DIE MITTEL- BIS LANGSTRECKE**

Durch die Umrüstung eines Triebwerks eines Regionalflugzeugs für die Wasserstoffverbrennung könnten Flugversuche durchgeführt werden, die die Atmosphäreneinflüsse quantifizieren und die Effizienz der Technologie testen. So könnten die Wasserdampfemissionen in der Atmosphäre untersucht werden, um deren komplexe Prozesse besser zu verstehen. Zunächst könnte die Kompatibilität mit Gasturbinen inklusive neuer Brennkammern erforscht werden und gleichzeitig der Zusammenhang zwischen Flugführung und der Wirkung der Wasserdampfemissionen weiter untersucht werden, um die Klimawirkung dieser Technologie möglichst zu vermeiden. Das Ergebnis eines solchen Flugdemonstrators wäre dann die unter Höhenbedingungen erprobte Wasserstoffverbrennung inklusive quantifizierter Klimawirkung. Sinnvolle Nachfolgeaktivitäten wären die industrielle Entwicklung eines Wasserstoffantriebs für die A320-Klasse und die Durchführung weiterer Messungen im Forschungsbereich, um die Routenführung zu optimieren.

#### **EMPFEHLUNG: NACHHALTIGE KRAFTSTOFFE UND ROUTING FÜR ALLE FLUGZEUGKLASSEN**

Die Wirkungen von Drop-in-Kraftstoffen können letztlich direkt durch höhere Beimischungsraten (> 50 %) maximiert werden. Ideal für eine minimierte Klimawirkung sind sogenannte aromatenfreie Near-Drop-in-Kraftstoffe. Derzeit gibt es keine Zulassung für solche Kraftstoffe. Da das Beimischungslimit von 50 % (beziehungsweise 10 % bei SIP) einen Sicherheitspuffer darstellt, sind zuverlässige Methoden zur Kraftstoffbewertung und zum Flugzeugkomponentendesign erforderlich – zum Beispiel Prüfung aller Dichtungen. Weitergehende Forschungsvorhaben zur genauen umfassenden Identifikation der Zusammenhänge zwischen Kraftstoffzusammensetzung und Flugzeug sind nötig.

Durch Co-Optimierung von Kraftstoff und Brenner lassen sich bei Near-Drop-in-Kraftstoffen die CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 80 %, die

Ruß- und Partikelemissionen um bis zu 90 % und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um beinahe 100 % reduzieren. Dafür muss an der Entwicklung kraftstoffsensitiver Methoden für das Design von kraftstoffoptimierten Komponenten geforscht werden. Langzeit-Messungen von realen Passagierflügen mit Near-Drop-in-Kraftstoffen würden die notwendigen Messungen in realer Umgebung liefern, um die Kraftstoffe in Zusammenhang mit der Verbrennung zu optimieren. Dadurch könnten sowohl die CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch die Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen minimiert werden, insbesondere wenn die Flüge durch klimaoptimierte Routenführung geführt werden. So würden umfassende Daten für die Anpassung von Zulassungsprozessen und Nachhaltigkeitskriterien dargestellt. Zunächst sollte die Industrie auf alternative Kraftstoffe umstellen, während die Forschung optimierte Routenführung weiter untersucht.

Die Auslegung von Flügel und Rumpf sowie die aerodynamische Integration von Triebwerk und Leitwerken, die Widerstandsminimierung und der Systemleichtbau gehören zu den Schlüsseltechnologien auf dem Weg zum emissionsfreien Fliegen. Es ist demzufolge erforderlich, eine disziplin-übergreifende Integration aller Einzeltechnologien im Flugzeugentwurf vorzunehmen, um die einzelnen Vorteile zu einem Gesamtvorteil in zweistelliger Prozentzahl für das Flugzeug zu entwickeln. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass Verbesserungen in der aerodynamischen Güte und ein grundsätzlich neues Konzept des Systemleichtbaus neben dem Triebwerk wesentliche „Enabler“ für einen kraftstoff-effizienten und wirtschaftlichen Betrieb klimaneutraler Flugzeuge sind.

Hier müssen die technische und ökonomische Machbarkeit bis hin zu Fragen von Resilienzen sowie der Sicherheit und Akzeptanz in der Bevölkerung untersucht werden. Für die Nutzung neuer Energieträger wie Wasserstoff oder auch Strom muss eine neue Infrastruktur geschaffen werden, um die Energie an die Flugzeuge zu verteilen. Alle diese Aspekte müssen bei allen Demonstratoren berücksichtigt werden, um sowohl die geringstmögliche Klimawirkung zu erreichen als auch deren Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

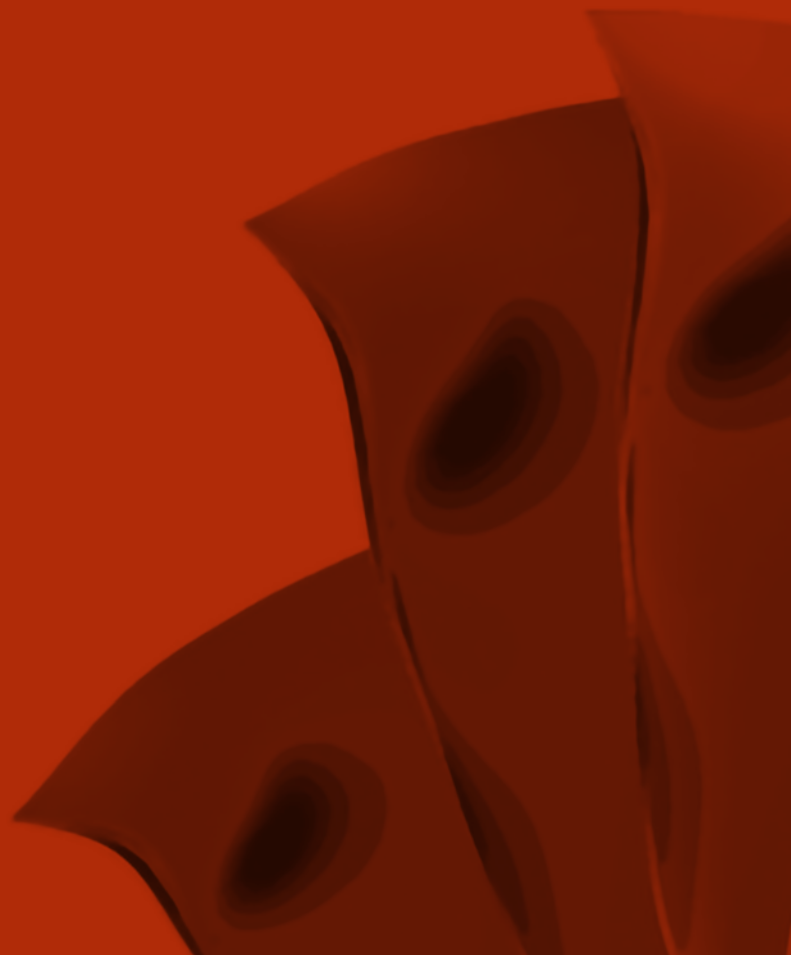
## 8.4. EU-EBENE

Auf der Grundlage des „Green Deals“ der Europäischen Kommission sind im Rahmen des nächsten Europäischen Forschungsrahmenprogramms „Horizon Europe“ (2021–2027) signifikante Fördermittel für klimarelevante Forschung und damit auch für den umweltfreundlichen Luftverkehr zu erwarten. In Anlehnung an den bisherigen Ansatz von Clean Sky wird seitens der privaten Stakeholder für eine mögliche Partnership „Clean Aviation“ ein Gesamtvolumen von 12 Mrd. Euro bei einer Förderung von 4 Mrd. Euro in den Bereichen elektrisches und hybrid-elektrisches Fliegen, hocheffiziente Gasturbinen und alternative Kraftstoffe vorgeschlagen. Darüber hinaus sind in den regulären Arbeitsprogrammen der Kommission weitere Themen zum klimaneutralen Luftverkehr angedacht und auch ein europäischer Demonstrator mit einem Volumen von etwa 5 Mrd. Euro ist denkbar.

Weiterhin sind Synergien mit zu erwartenden Partnerships zu den Themen ATM (Nachfolge SESAR 2020), Brennstoffzelle (Nachfolge FCH2), Batterien (neue Partnership), Circular Economy (Nachfolge BBI) und Digitalisierung (Nachfolge ECSEL) geplant. Auch diese Partnerships sollen von regulären Arbeitsprogrammen der Kommission flankiert werden. Der genaue Umfang der europäischen Fördermittel, die technischen Inhalte und Förderinstrumente werden jedoch erst für Ende 2020 erwartet.

# FAZIT

# 9





Mit der Vision des emissionsfreien Luftverkehrs hat sich die Luftfahrt ein hehres Ziel gesetzt. Um ihren ökologischen Fußabdruck auf null zu reduzieren, sind erhebliche Entwicklungen in den aufgeführten Bereichen nachhaltige Kraftstoffe, neue Energieträger, neue Flugzeugkonzepte und Komponenten sowie alternative Antriebslösungen notwendig. Aufgrund des hohen Reifegrades aktueller Flugzeuge müssen dabei völlig neue radikale Technologien in Betracht gezogen werden. Hinzu kommt, dass alle Aspekte Auswirkungen auf der Luftfahrzeugebene mit sich bringen. Das heißt, für eine reibungslose Integration neuer Technologien in das Gesamtsystem sind Änderungen an der Konfiguration des Fluggeräts notwendig, die sich im gesamten Lebenszyklus eines Luftfahrzeugs widerspiegeln. Um alle diese Aspekte umfassend bewerten zu können, ist eine disziplinübergreifende Fähigkeit zum Entwurf und zur Bewertung des Gesamtsystems notwendig. Die deutsche Luftfahrtlandschaft ist diesbezüglich bereits gut aufgestellt, doch mit Blick auf die anstehenden Herausforderungen ist es wichtig, diese Fähigkeiten zu erhalten und weiter auszubauen.

Die Luftfahrt von morgen ist umweltschonend, leise und sicher. Die Einführung der neuen Technologien wird den Luftverkehr der Zukunft stark verändern: Der Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe stellt ein großes Potenzial dar. Zugelassene Drop-in-Kraftstoffe – eine Mischung aus synthetischen und konventionellen Kraftstoffen – können bereits heute wie fossile Kraftstoffe in allen Flugzeugen eingesetzt werden. Die Kosten und Verfügbarkeit nachhaltiger Flugkraftstoffe entsprechen derzeit allerdings nicht den Anforderungen für eine nachhaltige Luftfahrt und erfordern massive Investitionen. Künftig wird Wasserstoff aufgrund seiner großen Energiedichte sowie seines erheblichen Emissionsreduktionspotenzials, verbunden mit neuen Gasturbinenkonzepten, zunehmend an Bedeutung gewinnen. Unbemanntes und autonomes Fliegen wird als Lösung für den schnellen und schadstoffarmen Personentransport in urbanen Räumen gesehen, batterie-elektrisch angetriebene Regionalflugzeuge werden für kurze Reisen innerhalb von Ballungsgebieten eingesetzt werden und

Luftfahrzeuge mit Antriebskonzepten auf Basis von Brennstoffzellen lösen perspektivisch heutige Flugzeuge auf der Kurz- und Mittelstrecke ab. Großes Potenzial für Emissionsminderungen haben nachhaltige Kraftstoffe in Verbindung mit neuen Gasturbinenkonzepten. Perspektivisch ist der Einsatz von turbo-hybrid-elektrischen Antriebskonzepten bis hin zu Brennstoffzellen auch auf der Langstrecke denkbar.

Die Transformation der Luftfahrtindustrie verlangt vielfältige Investitionen in Entwicklung, Zulassung und Infrastruktur sowie die Unterstützung nationaler und internationaler politischer Entscheidungen. Die effiziente Erforschung neuer Schlüsseltechnologien und Konzepte erfordert ein Umdenken in allen Bereichen, was bedeutet, dass sich auch das Bildungssystem an die zukünftigen Marktentwicklungen anpassen muss. Der Luftfahrtingenieur von heute ist nicht mehr der Luftfahrtingenieur von morgen. Durch neue Marktanforderungen, die digitale Transformation und die damit einhergehende Änderung der Arbeitswelt und spezieller Aufgabenbereiche in der Luftfahrt ändert sich auch der Bedarf der Industrie gegenüber den akademischen Bildungsbereichen sowie der industriellen Großforschung. Daher sind diese im Zusammenhang der Transformation der Luftfahrt dazu angehalten, Konzepte zu entwickeln, um adäquat auf diese Veränderungen reagieren zu können.

Die erfolgreiche Einführung von Schlüsseltechnologien für einen klimafreundlichen Luftverkehr führt zwingend über Flugversuche und damit über ein planmäßiges Demonstratoren-Programm. Bis die globale Flugzeugflotte durch die nächste Generation in rund 20–30 Jahren ersetzt wird, sind neben Investitionen in neue Technologien parallel finanzielle Mittel für die Verbesserung aktueller Luftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Klimawirkung unausweichlich. Folglich sieht sich die Luftfahrt in den nächsten dreißig Jahren mit besonderen Anstrengungen hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit konfrontiert, die Forschung, Politik und Industrie nur in gemeinsamer, abgestimmter Anstrengung lösen können.



**Herausgeber**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Linder Höhe, 51147 Köln

**Gestaltung**

CD Werbeagentur GmbH, cdonline.de

**Druck**

Meinders + Elstermann GmbH & Co. KG

**Drucklegung**

10/2020

**Bildnachweis**

Alle Bilder und Abbildungen: DLR, außer:  
S. 14: Umweltbundesamt, S. 21: DLR und DLR/NASA/Friz,  
S. 31, unten: icct.CO<sub>2</sub> emissions from commercial aviation, 2018  
Graver, Zahang, Rutherford, S. 34, unten links: Premium Aerotec,  
S. 58–59 Grob, Airbus, Martin Kulcsar

Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung nur nach vorheriger  
Absprache mit dem DLR gestattet. Die in den Texten verwendeten  
weiblichen oder männlichen Bezeichnungen für Personengruppen  
gelten für alle Geschlechter.

**DLR.de**

