



AUF DEM WEG ZU EINER EMISSIONSFREIEN LUFTFAHRT

Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal



Inhalt

Zusammenfassung	4
Vorwort	6
1. Einleitung	8
2. Lösungsansatz des DLR	14
Vision: eine emissionsfreie Luftfahrt	15
Mission: das DLR als virtueller Hersteller	16
Vorgehen: technologieoffene Transformation	16
3. Wesentliche Themengebiete	18
Einleitung	19
Emissionsarme Luftfahrtantriebe	22
Energieeffizientes Flugzeug	24
Emissionsreduziertes Lufttransportsystem	26
Digitalisierung	28
4. Die Luftfahrtforschung des DLR	30
Fazit	38

Zusammenfassung

Flugzeug und Luftverkehr als Gesamtsystem stehen im Mittelpunkt der Luftfahrtforschung. **Das DLR betrachtet alle Technologien ergebnisoffen und bewertet und integriert sie im Gesamtsystem.** Es sieht sich so als Architekt und Integrator in der Luftfahrtforschung. Auf unsere Vision einer emissionsfreien Luftfahrt arbeiten wir gemeinsam mit unseren internationalen Partnern aus Forschung, Industrie und Wirtschaft hin.

Vision: eine emissionsfreie Luftfahrt

Die Forschung des DLR bereitet den Weg in die Zukunft der Luftfahrt und gestaltet ihre Transformation im Sinne des klimaneutralen Fliegens mit.

Mission: das DLR als virtueller Hersteller

Wir entwickeln hochintegrierte Technologien und Methoden, Prozesse und Lösungen für eine klimaneutrale Luftfahrt. Damit leisten wir unseren Beitrag zum Green Deal in der Luftfahrt. Forschung und Entwicklung erfolgen in den Bereichen neuer Flugzeugkonzepte und Komponenten sowie alternativer Antriebslösungen mit einem Fokus auf der Nutzung nachhaltiger Luftfahrt-Brennstoffe (SAF) inklusive neuer Energieträger (z. B. Wasserstoff) bis hin zu klimaoptimierten Flugrouten. Dabei agieren wir als virtueller Flugzeughersteller (Virtual OEM).

Emissionsarme Luftfahrtantriebe

Turboantriebe mit nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffen
Auf den Kurz- bis Langstrecken ermöglichen hoch effiziente Turbofan-Triebwerke gemeinsam mit regenerativ erzeugtem Kerosin einen weitgehend klimaneutralen Betrieb. Möglich ist das für die gesamte bestehende Flotte mit nur minimalen technischen Modifikationen der Triebwerke und der vorhandenen Infrastruktur.

Wasserstoff als Energieträger

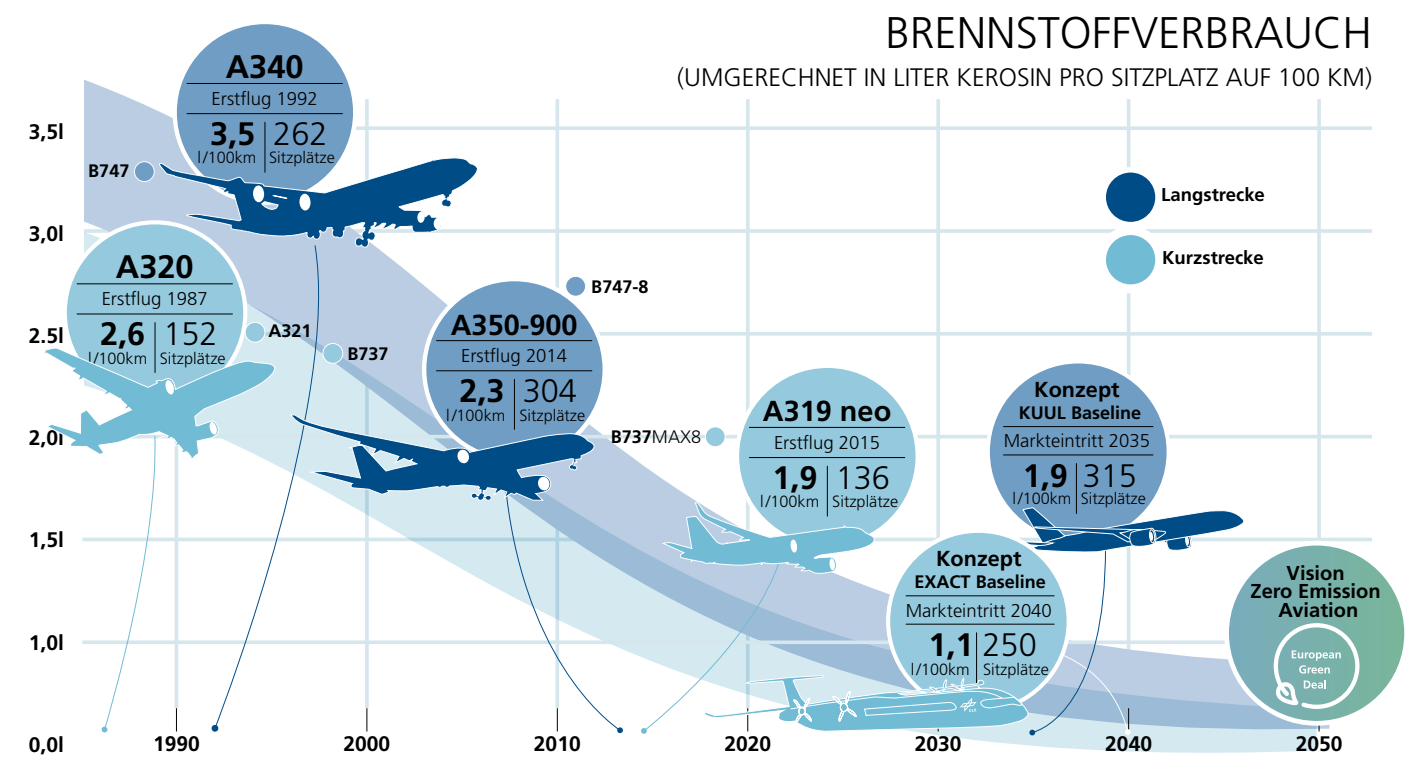
Wasserstoff kann die lokalen CO₂-Emissionen im Luftverkehr auf null reduzieren. Für alle Wasserstoff-Antriebe stellen die Sicherheit, das Volumen sowie Gewicht und Integration eine besondere Herausforderung dar. Das erfordert eine intensive Erforschung von H₂-Tanksystemen inklusive der Systemarchitektur sowie neuartiger Flugzeugkonzepte, die vorwiegend mit dem Volumeneinfluss umgehen müssen. Mittelfristig ist der Einsatz von Wasserstoff besonders für Flugzeuge im Regional- und Kurz-Streckenbereich geeignet. Die Erforschung einer sicheren und zuverlässigen Wasserstoff-Verbrennung und des Umgangs mit dem Energieträger soll in den nächsten fünf Jahren die kommerzielle Anwendbarkeit in Flugzeugen bis hin zur Demonstration vorbereiten.

Elektrische Antriebe mit Wasserstoff oder Batterien als Energieträger

Trotz ihrer sehr hohen Wirkungsgrade sind sowohl Batterien als auch Brennstoffzellen auf absehbare Zeit nur für Kleinflugzeuge und Regionalflugzeuge geeignet. Notwendig ist die Erforschung von Hochleistungs-Elektromotoren, Batterien und Brennstoffzellen. Dann kann in den nächsten fünf Jahren über eine mittelfristige Anwendung in Verkehrsflugzeugen entschieden werden.

Energieeffizientes Flugzeug

Der Energiebedarf kommender Flugzeuge muss bis zum Jahr 2050 mindestens um die Hälfte reduziert werden. Ein geringerer Energiebedarf des Flugzeugs wirkt sich direkt in einem geringeren Verbrauch der Antriebssysteme aus, reduziert Restemissionen und kompensiert die höheren Kosten künftiger Energieträger. Dafür notwendig sind Technologien zur Reduktion des aerodynamischen Widerstands und des Gesamtgewichts gemeinsam mit innovativer Flugregelung und Sensorik. Um diese Technologien optimal integrieren zu können, müssen sie in der Auslegung neuer Flugzeugkonfigurationen bereits ganz zu Beginn in der Entwurfsphase berücksichtigt werden.



In den vergangenen Jahrzehnten sind die Emissionen der Luftfahrt pro Passagier und 100 Kilometer kontinuierlich gesunken. Weiteres Potential zur Emissionsreduktion versprechen neue Flugzeugkonzepte wie sie in den DLR-Projekten EXACT (Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies) und Kuul (Klimafreundlicher ultra-effizienter Langstreckenflug) entwickelt werden. Die Vision des DLR ist eine emissionsfreie Luftfahrt.

Lufttransportsystem

Gesamtsystembewertung

Die Bewertung des Lufttransportsystems umfasst alle Aspekte des Betriebes und seiner Auswirkungen. Mit den Ergebnissen soll die Wirkung eingeschätzt und eine Neugestaltung ermöglicht werden. Dafür ist in den kommenden fünf Jahren der Aufbau einer umfassenden und detaillierten Bewertungs- und Simulations-Plattform für das gesamte Lufttransportsystem vorgesehen, um das DLR als Architekt, Integrator und Berater weiter zu stärken.

Klimawirkung und Flugrouten

Großes Potential, die Klimawirkung des Flugverkehrs zu senken, bietet die Reduktion der Nicht-CO₂-Effekte – insbesondere durch geeignete Flugrouten auf der Lang- und Mittelstrecke. Um in den nächsten fünf Jahren die kommerzielle Umsetzbarkeit und Wirksamkeit von klimaoptimierten

Flugrouten nachzuweisen, bedarf es politischer Rahmenbedingungen und der Einführung technischer Neuerungen. Dazu gehören zunehmende Automatisierung und Standardisierung im Flugzeug, im Luftverkehrsmanagement und in der Flugführung.

Digitalisierung

Die Digitalisierung als Katalysator beschleunigt den Weg zur klimaneutralen Luftfahrt. Sowohl digitale Werkzeuge und Methoden als auch Entscheidungsprozesse, die durch Einsatz künstlicher Intelligenz unterstützt werden, tragen dazu bei, neue Konzepte und Technologien für den nachhaltigen Lufttransport in größeren und kreativeren Entwurfsräumen zu erforschen. Zugleich fördert die bessere Übereinstimmung von virtuellem und realem Produkt die beschleunigte Übertragbarkeit von Forschungsergebnissen in die Anwendung.

Vorwort

Die Luftfahrt ist ein fester Bestandteil unseres gesellschaftlichen Lebens, unserer globalen Mobilität. Sie trägt zum Austausch der Kulturen bei, fördert unseren Wohlstand. Doch erleben wir gegenwärtig einen der intensivsten Transformationsprozesse der Luftfahrtgeschichte. An dessen Ende soll und wird ein klimaverträglicher Luftverkehr stehen. Denn die Folgen des Klimawandels fordern unser konsequentes Handeln. Um unsere Ziele zu erreichen, muss es in den nächsten zwanzig Jahren gelingen, das Wachstum im Luftverkehr von der Umweltbelastung zu entkoppeln. Unsere Prognosen zeigen, dass der Luftverkehr bis zum Jahr 2050 klimaneutral werden kann.

Gegenwärtig stehen wir vor zwei großen Herausforderungen. Zum einen müssen wir die aktuellen Flugzeuge weiter verbessern, deren Effizienz steigern und Klimawirkung reduzieren. Zum anderen gilt es, den Weg für eine neue Flugzeuggeneration zu ebnen. Das erfolgt unter anderem durch neue Flugzeugkonzepte, neue Antriebe und Leichtbauprinzipien sowie Systemarchitekturen.

Hier werden neue Energieträger wie nachhaltige Luftfahrt-Brennstoffe (SAF) und langfristig Wasserstoff eine wichtige Rolle spielen, um die CO₂- und auch die Nicht-CO₂-Effekte auf das Klima zu reduzieren. Eine weitere aussichtsreiche Möglichkeit ist das Fliegen auf klimafreundlichen Flugrouten. Hierfür gilt es, die technologischen und operativen Voraussetzungen zu schaffen. Zusätzlich muss zukünftig der gesamte Lebenszyklus eines Flugzeuges stärker betrachtet werden, von der Materialentstehung über die Entwicklung, die Produktion, den Betrieb und die Wartung bis zur Außerdienststellung. Dies alles wird eingebettet in eine Gesamtbewertung des Lufttransportsystems. Diese ermöglicht eine ganzheitliche Analyse, wie sich die Luftfahrt mit all ihren Facetten auf die Umwelt und speziell auf das Klima auswirkt. Notwendige Neuerungen lassen sich so klarer umreißen und gezielter gestalten.

Auf dem Weg zum klimaneutralen Fliegen liegt erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, der einer kontinuierlichen Förderung und Unterstützung bedarf.

Besondere Bedeutung kommt dabei dem Transfer der Erkenntnisse in die Industrie und in die Wirtschaft zu. Dank der Kompetenzen und der Fähigkeiten von mehr als 25 für die Luftfahrt forschenden DLR-Instituten und -Einrichtungen sowie einer einzigartigen Forschungsinfrastruktur verfügt das DLR über ein breites Verständnis der Luftfahrt und aller Möglichkeiten, diese für das 21. Jahrhundert fit zu machen. Damit sehen wir uns als Architekt und Integrator in der Luftfahrtforschung.

Mit der neuen Luftfahrtstrategie zum European Green Deal verfolgt das DLR die Vision einer emissionsfreien Luftfahrt. Dafür forschen und entwickeln wir zusammen mit der nationalen und internationalen Luftfahrtindustrie und -forschung im gesamten Spektrum: von Flugzeugkonzepten und -Komponenten, über alternative Antriebslösungen unter dem Einsatz neuer Energieträger bis hin zu klimaoptimierten Flugrouten. Das ist unser Beitrag zum Green Deal in der Luftfahrt.



Anke Kaysser-Pyzalla

Prof. Dr.-Ing. Anke Kaysser-Pyzalla,
Vorstandsvorsitzende des DLR



Markus Fischer

Dr.-Ing. Markus Fischer,
Bereichsvorstand Luftfahrt

1. Einleitung

Die Emissionen des Luftverkehrs müssen vom exponentiell steigenden Luftverkehrsaufkommen entkoppelt werden, um eine klimaneutrale Luftfahrt zu ermöglichen.

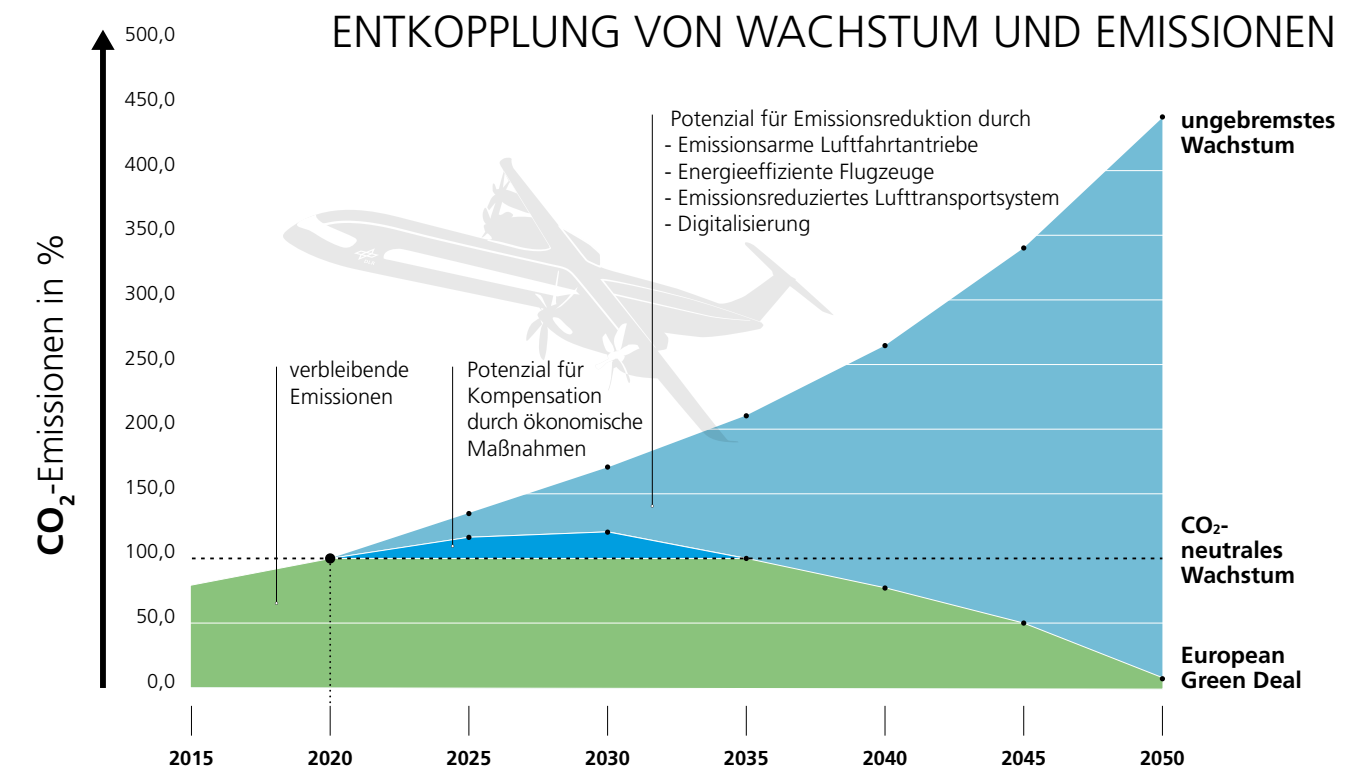


Abbildung 1: Trotz der kurzzeitigen Einbrüche des Luftverkehrs in der COVID-19-Pandemie wird mittelfristig wieder ein exponentielles Wachstum des Verkehrsaufkommens erwartet. Die Emissionen des Luftverkehrs müssen von diesem exponentiell steigenden Luftverkehrsaufkommen entkoppelt werden, um eine klimaneutrale Luftfahrt zu ermöglichen.

Die Auswirkungen des vom Menschen verursachten Klimawandels sind bekannt, und die Notwendigkeit, die CO₂-Emissionen nachhaltig zu senken, steht außer Frage. Der Anteil der Luftfahrt an der Erwärmung der Atmosphäre wird dabei zwar nur mit 2 % bis 5 % beziffert, das exponentielle Wachstum des weltweiten Luftverkehrs macht jedoch ein umgehendes Handeln erforderlich:

Die Luftfahrtbranche verzeichnet eine Verdoppelung des Luftverkehrsaufkommens alle 15 Jahre. Dem steht gegenwärtig mit jeder Flugzeuggeneration in einem vergleichbaren Zeitraum nur eine Effizienzsteigerung um etwa 15 % gegenüber. Die von der Luftfahrt verursachten Emissionen haben in vieler Hinsicht eine unerwünschte Wirkung und müssen zwingend reduziert werden. Dafür reicht allein die evolutionäre Weiterentwicklung von heutigen Flugzeugen nicht mehr aus. Zusätzlich müssen revolutionäre Technologien der Herausforderung der Umweltbelastung durch die Luftfahrt begegnen. Neben dieser signifikanten Steigerung der Ökoeffizienz des einzelnen Luftfahrzeugs müssen gleichzeitig die komplexe globale, nachhaltige Lieferkette, vorangehende Produktionsprozesse und Materialien sowie Aspekte der Infrastruktur betrachtet werden. Revolutionäre und unmittelbar verfügbare Lösungen für eine emissionsfreie Luftfahrt gibt es aufgrund der immensen technologischen

Herausforderungen insbesondere zur Energie- und Leistungsdichte alternativer Antriebe derzeit nicht.

Aufgrund der hohen technischen und finanziellen Risiken und der unter allen Betriebsbedingungen zu gewährleistenden Sicherheit ist ein Technologiewandel in der Luftfahrt zudem ein langwieriger und kostenintensiver Prozess, insbesondere durch umfangreiche Zulassungsverfahren. Zusätzlich ist die Luftfahrtbranche von der Corona-Krise substantiell betroffen, und zum heutigen Zeitpunkt ist unklar, wann es zu einer nachhaltigen Erholung der Branche kommen wird. Der Dachverband der Fluggesellschaften, die International Air Transport Association (IATA), rechnet erst frühestens 2024 mit einer vollständigen Erholung des Luftverkehrs.

Klar ist: Langfristig wird der Luftverkehr wieder wachsen. Umso dringlicher wird die Frage: **Wie gestaltet sich der Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt der Zukunft?**

Für einen klimaneutralen Luftverkehr bis 2050 müssen unterschiedliche Akteure in drei wesentlichen Handlungssträngen eng zusammenarbeiten: die Luftfahrtforschung, die Energieforschung sowie die Gesetzgebung.

Etwa zwei Drittel der Klimawirkung der Luftfahrt werden von Nicht-CO₂-Emissionen wie Kondensstreifen verursacht. In diesem Dokument werden die CO₂-Emissionen als etablierte Messgröße zum Vergleich von Antriebsalternativen verwendet.



BEGRIFFLICHKEITEN

Es ist möglich, das Wachstum der Luftfahrt von ihrer Umweltbelastung zu entkoppeln, aber die Umweltbelastung durch die Luftfahrt ist vielfältig und muss deswegen differenziert betrachtet werden. In diesem Dokument werden in diesem Zusammenhang die folgenden Begriffe verwendet:

- Unter **Emissionen** werden sowohl der Ausstoß von bestimmten, üblicherweise schädlichen Stoffen als auch einige immaterielle Störfaktoren wie Lärm verstanden. Die Einwirkungen, die solche Emissionen verursachen, sind die Immissionen.
- Die **Vision der emissionsfreien Luftfahrt** stellt ein ideales Ziel dar, das nur asymptotisch erreichbar ist. Die tatsächlichen Null-Emissionen können zwar voraussichtlich nicht erreicht werden, aber Technologien und betriebliche Prozesse werden so weit wie möglich darauf ausgerichtet.
- Eine **umweltverträgliche Luftfahrt** berücksichtigt ebenfalls alle Emissionen, legt sich aber nicht auf einen absoluten Nullwert der angestrebten Emissionen fest.
- Eine **klimaneutrale Luftfahrt** wird durch eine ausgeglichene Klimawirkung aller CO₂-, aber auch Nicht-CO₂-Effekte charakterisiert, sodass die Luftfahrt keinen Nettobeitrag mehr zur Erderwärmung liefert. Insbesondere wird hier der Lärm nicht betrachtet.

- Das Konzept einer **CO₂-neutralen Luftfahrt** berücksichtigt nur die CO₂-Emissionen als einfache und etablierte Messgröße, die durch unterschiedliche technische und marktbasierende Mechanismen kompensiert werden können. Forschungen zeigen jedoch, dass die CO₂-Emissionen lediglich für ungefähr ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs verantwortlich sind.
- Das **CO₂-Äquivalent** ist ein metrisches Maß, das den Vergleich von Emissionen verschiedener Treibhausgase auf der Grundlage ihres Treibhauspotenzials ermöglicht. Dafür werden Mengen anderer Gase in die äquivalente Menge CO₂ umgerechnet, die das gleiche Treibhauspotenzial haben.
- Das **Konzept von Nachhaltigkeit** stellt den Oberbegriff für die genannten Zielkonzepte dar und berücksichtigt beispielsweise auch soziale Aspekte.
- In diesem Zusammenhang definieren die **Systemgrenzen** den Bereich, in dem das System Luftfahrt betrachtet wird, und trennen es von seinem Umfeld. Nur innerhalb der Systemgrenzen können Gestaltungsmöglichkeiten genutzt werden. Einflüsse des Umfelds sind bestenfalls als Randbedingungen gegeben.

Luftfahrtforschung für einen energieeffizienten Luftverkehr

Innovative Mobilitäts-, Antriebs- und Brennstoffkonzepte erfordern neue und effiziente Luftfahrtstrukturen. Sie müssen modular und flexibel sein und voraussichtlich ein viel breiteres Mobilitätsspektrum bedienen als bisher. Zudem ist es aufgrund der geringen Energie- und Leistungsdichte von alternativen Antriebssystemen und der zukünftig deutlich teureren nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) eine zwingende Voraussetzung, dass der Energiebedarf neuer Flugzeuge substanziell reduziert wird. Hierfür sind in der Luftfahrtforschung deutlich höhere Anstrengungen als bisher erforderlich, um zukünftig notwendige, mindestens doppelt so große Effizienzsteigerungen erreichen zu können. Um notwendige Technologien umfassend bewerten zu können, ist

eine disziplinübergreifende Fähigkeit zum Entwurf und zur Bewertung des Gesamtsystems unerlässlich. **Wesentlicher Forschungsbedarf liegt in den Themengebieten emissionsarme Antriebe, effiziente ökologische Flugzeuge, effizientes Lufttransportsystem und Digitalisierung in der Luftfahrt.** Die Schwerpunkte betreffen die Technologieentwicklung, die Integration der technologischen Komponenten in das Flugzeug sowie das Verständnis für die Auswirkungen aller Aspekte sowohl auf der Flugzeugebene als auch bezogen auf das Gesamtsystem Luftfahrt. Für die konsequente Weiterentwicklung der Technologien und ihre prinzipielle Demonstration zur Reduktion der Klimawirkung bei gleichzeitiger Gewährleistung der hohen Sicherheitsstandards sind Flugversuche zwingend erforderlich.

Die Europäische Union soll bis 2050 klimaneutral werden. Bis dahin sollen keine Nettotreibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden. Das Wirtschaftswachstum soll von der Ressourcennutzung abgekoppelt und der Übergang zu einer ressourcenschonenden Wirtschaft gerecht und inklusiv werden.

Energieforschung für nachhaltige Energieträger

Für die Energiewende in der Luftfahrt ist eine enge Zusammenarbeit von Energie- und Luftfahrtsektor essenziell. **Eine klimaneutrale Luftfahrt ist von CO₂-neutralen Energiequellen und daraus herzustellenden nachhaltigen Brennstoffen abhängig.** Die wirtschaftliche Verfügbarkeit von regenerativen Energiequellen und nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffen gehört daher zu den großen Handlungsfeldern.

Gesetzgebung für die konsequente Umsetzung einer nachhaltigen Luftfahrtpolitik

Um nachhaltige Lösungen für eine klimaneutrale Luftfahrt umsetzen zu können, müssen in enger Zusammenarbeit von Forschung, Industrie und Behörden die **Grundlagen für die Zulassung von neuartigen Antriebskonzepten und deren Integration in die Flugzeugzelle** geschaffen werden. Da nachhaltige Energieträger und die Realisierung von klimaoptimierten Flugrouten aller Voraussicht nach auch steigende Kosten verursachen werden, ist ein weltweit koordiniertes Vorgehen der Gesetzgeber notwendig. Es sind zudem globale Regularien erforderlich, um die Entwicklung und Umsetzung von marktbasierenden Maßnahmen wie dem Emissionshandel und der Klimakompensation zu unterstützen.

Der European Green Deal

Mit dem European Green Deal stellte die Europäische Kommission im Dezember 2019 eine neue Wachstumsstrategie in Europa vor, in der sie Klimaschutz, Nachhaltigkeit und Ökologie in den Fokus ihrer politischen Agenda rückt. Das übergeordnete Ziel: **Die Europäische Union (EU) soll bis 2050 klimaneutral werden.** Bis dahin sollen keine Nettotreibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden, das Wirtschaftswachstum soll von der Ressourcennutzung abgekoppelt werden und der Übergang zu einer ressourcenschonenden Wirtschaft soll gerecht und inklusiv sein. Das erfordert auch eine klimaneutrale, ressourcenschonende Luftfahrt.

Der European Green Deal versteht sich als Fahrplan für eine nachhaltige Wirtschaft in der EU und adressiert in seinem Aktionsplan die wichtigsten Ziele und Maßnahmen in den Bereichen Energie, Verkehr, Umwelt und Klimaschutz. Dafür plant die EU, Innovationen für klimaneutrale und kreislauforientierte Produkte zu fördern. Das verspricht einen neuen

Schub für Forschungs- und Entwicklungsinitiativen, die den ökologischen Fußabdruck der Luftfahrt im gesamten Lebenszyklus reduzieren können. **Über die Entwicklung nachhaltiger Technologien soll zudem eine Stärkung der europäischen Wettbewerbsfähigkeit erreicht werden.**

Weiter adressiert der European Green Deal eine schnelle Umstellung auf eine nachhaltige und intelligente Mobilität. Um Klimaneutralität zu erreichen, sollen die verkehrsbedingten Emissionen bis 2050 um 90 % gesenkt werden. Alle Verkehrsträger sollen zu dieser Verringerung beitragen. Subventionen für fossile Brennstoffe sollen abgeschafft werden und die Europäische Kommission wird die derzeitigen Steuerbefreiungen, auch für Luftfahrt-Brennstoffe, überprüfen. **Diese Maßnahmen sollen die Wettbewerbsvorteile herkömmlicher Brennstoffe abschaffen und eine wirtschaftliche Einführung alternativer Brennstoffe ermöglichen, da sie die vielversprechendste Alternative darstellen, um die Emissionen kurzfristig und flottenübergreifend zu senken.** Parallel dazu plant die EU, die Produktion und Verbreitung nachhaltiger Luftfahrt-Brennstoffe voranzutreiben und durch entsprechende Gesetzgebung zu fördern. Darüber hinaus sollen den Luftfahrtunternehmen im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems weniger Zertifikate kostenlos zugeteilt werden, um die Emissionen weiter zu reduzieren. Zudem soll im Bereich des Luftverkehrsmanagements der Single European Sky (SES) weiter vorangetrieben werden, um die betriebliche Effizienz des Lufttransportsystems weiter zu optimieren und um zu einer Senkung der Emissionen aus dem Luftverkehr durch einen höheren Automatisierungsgrad beizutragen. Außerdem wird die automatisierte und vernetzte multimodale Mobilität gemeinsam mit intelligenten Verkehrsmanagementsystemen, die durch die Digitalisierung ermöglicht werden, eine immer wichtigere Rolle spielen.

Neue Technologien, nachhaltige Lösungen und bahnbrechende Innovationen sind für die Verwirklichung der Ziele von entscheidender Bedeutung. **Neben großmaßstäblicher Einführung und Demonstration neuer Technologien in allen Sektoren müssen neue, innovative Wertschöpfungsketten geschaffen werden. Im EU-Förderprogramm Horizon Europe dienen mindestens 35 % der Mittelausstattung der Finanzierung neuer Klimaschutzlösungen.** Angesichts des benötigten Investitionsumfanges sollen darüber hinaus sowohl der öffentliche als auch der private Sektor mobilisiert werden.

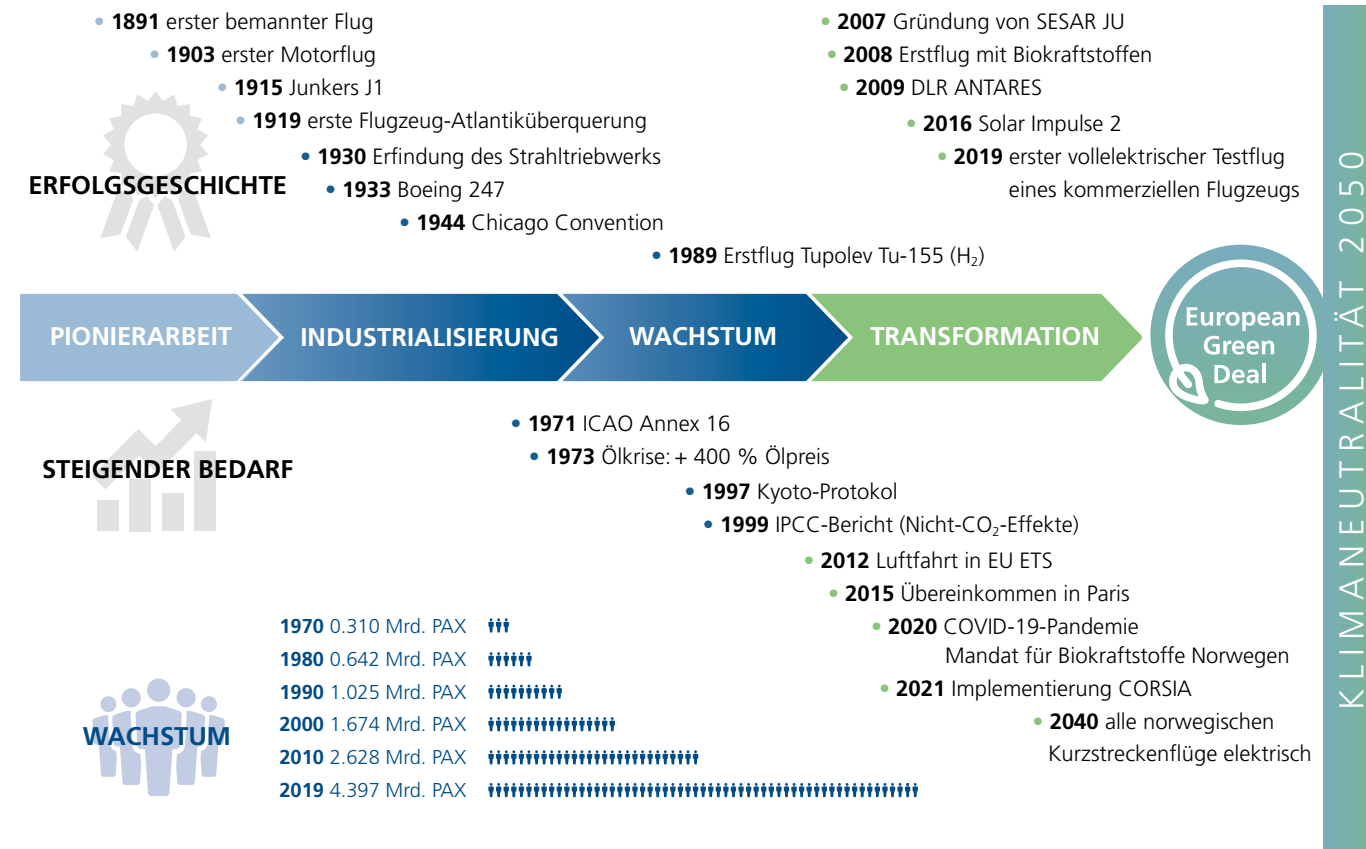
Globale Entwicklungen und Herausforderungen

In der Geschichte der Luftfahrt wirkten vielfältig wechselnde Anforderungen auf die Entwicklungen der Branche ein. In der Pionierphase bis zur Erfindung des Jetantriebs wurden die technologischen Grundsteine für die Luftfahrt als zusätzlicher Verkehrsträger gelegt. An die Pionierjahrzehnte schließt sich in den 1930er-Jahren eine Phase der Industrialisierung an. Die folgenden Dekaden sind von wegweisenden Technologieentwicklungen sowie von Standardisierungen und Regulierungen geprägt. Technologien wurden schrittweise auf größere Luftfahrzeuge übertragen und das Flugzeug etablierte sich in dieser Zeit als attraktiver Verkehrsträger. Die dritte Phase ab den 1990ern ist gekennzeichnet von exponentiellem Wachstum der Luftfahrt. Dieses ist mit einem dra-

matischen Emissionsanstieg sowie mit ersten Forschungen zur Klimawirkung der Luftfahrt verbunden. **Dabei rückten schon in den 1990er-Jahren nicht nur die CO₂-Emissionen in den Fokus, sondern auch Nicht-CO₂-Emissionen. Das Pariser Klimaschutzabkommen (2015) sowie der European Green Deal (2019) markieren schließlich den Beginn einer vierten Phase der Transformation.** Weltweit wurde die Notwendigkeit erkannt, die Luftfahrtemissionen drastisch zu senken, und der politische Druck auf die Industrie und Forschung wurde international erhöht. Auch die deutsche Politik setzt stark auf Nachhaltigkeit. So fordern die Luftfahrtstrategie der Bundesregierung, die nationale Wasserstoffstrategie sowie die deutsche Power-to-Liquid-Roadmap eine Transformation in der Luftfahrt, die den CO₂-neutralen Luftverkehr ermöglichen soll.

Die merklichen Auswirkungen des Klimawandels, die Globalisierung des Welthandels sowie der Erhalt der Spitzentechnologie in Deutschland und Europa erfordern einen Paradigmenwechsel von der überwiegend kosten- und produktionsratengetriebenen Leistungs- und Effizienzerhöhung hin zu einer klimaneutralen, nachhaltigen Luftfahrt.

ENTWICKLUNGEN UND HERAUSFORDERUNGEN DER GLOBALEN LUFTFAHRT



Die technologischen Herausforderungen für eine emissionsfreie Luftfahrt sind enorm, insbesondere bei der Energie- und Leistungsdichte alternativer Antriebe und Energieträger sowie bei der Charakterisierung der Klimawirkung unterschiedlicher Emissionsarten.

Abbildung 2: Die Geschichte der Luftfahrt kann in vier große Phasen eingeteilt werden: Pionierphase, Industrialisierung, exponentielles Wachstum, Transformation hin zu einer emissionsfreien Luftfahrt.

2. Lösungsansatz des DLR



Vor dem Hintergrund der aktuellen globalen Trends und insbesondere der Herausforderung, eine klimaneutrale Luftfahrt zu ermöglichen, **setzt sich die Luftfahrtforschung des DLR das ambitionierte Ziel eines weitgehend emissionsfreien Luftverkehrs. Um dieses idealisierte Ziel zu erreichen, bringt sie ihre spezifischen Stärken ein und gestaltet die Entwicklung hin zu einem möglichst nachhaltigen Luftverkehr der Zukunft aktiv mit.**

Vision: eine emissionsfreie Luftfahrt

Dank seines umfassenden und interdisziplinären Kompetenzspektrums kann das DLR die Transformation im Sinne des European Green Deal mitgestalten. Doch die Realisierung einer klimaneutralen Luftfahrt erfordert den Transfer der Forschungsergebnisse in die Entwicklung neuer Flugzeug- und Transportprodukte, um damit eine Marktdiffusion in die gesamte Flotte zu erreichen. Diesen Transfer gestaltet das DLR über die Beratung und Unterstützung von Politik und Industrie aktiv mit.

Mit der Vision eines emissionsfreien Luftverkehrs verfolgt die DLR-Luftfahrtforschung einen äußerst ambitionierten Anspruch. Auch wenn eine absolut emissionsfreie Luftfahrt technisch kaum realisierbar ist, sollte mindestens ein weitgehend klimaneutraler Luftverkehr unbedingt angestrebt werden. Dies betrifft nicht nur die einzelnen Technologien und Energieträger, sondern deren gesamten Lebenszyklus und deren zusammengefasste Wirkung im gesamten Lufttransportsystem. **Um Emissionen und insbesondere die Klimawirkung der Luftfahrt auf nahezu null zu reduzieren, sind erhebliche Entwicklungen in den Bereichen nachhaltige Luftfahrt-Brennstoffe, neue Energieträger, neue Flugzeugkonzepte und Komponenten sowie alternative Antriebslösungen und deren betriebliche Umsetzung mit klimaoptimierten Flugrouten notwendig.** Dieses Ziel muss von politischen, gesetzgebenden und gesellschaftlichen Treibern flankiert werden, um die ökologische Umsetzung mit ökonomischer Realisierbarkeit verbinden zu können. Die Energiewende in der Luftfahrt verlangt vielfältige Investitionen in Entwicklung, Zulassung und Infrastruktur sowie die Unterstützung durch nationale und internationale politische Entscheidungen.

VISION UND MISSION DER LUFTFAHRTFORSCHUNG DES DLR

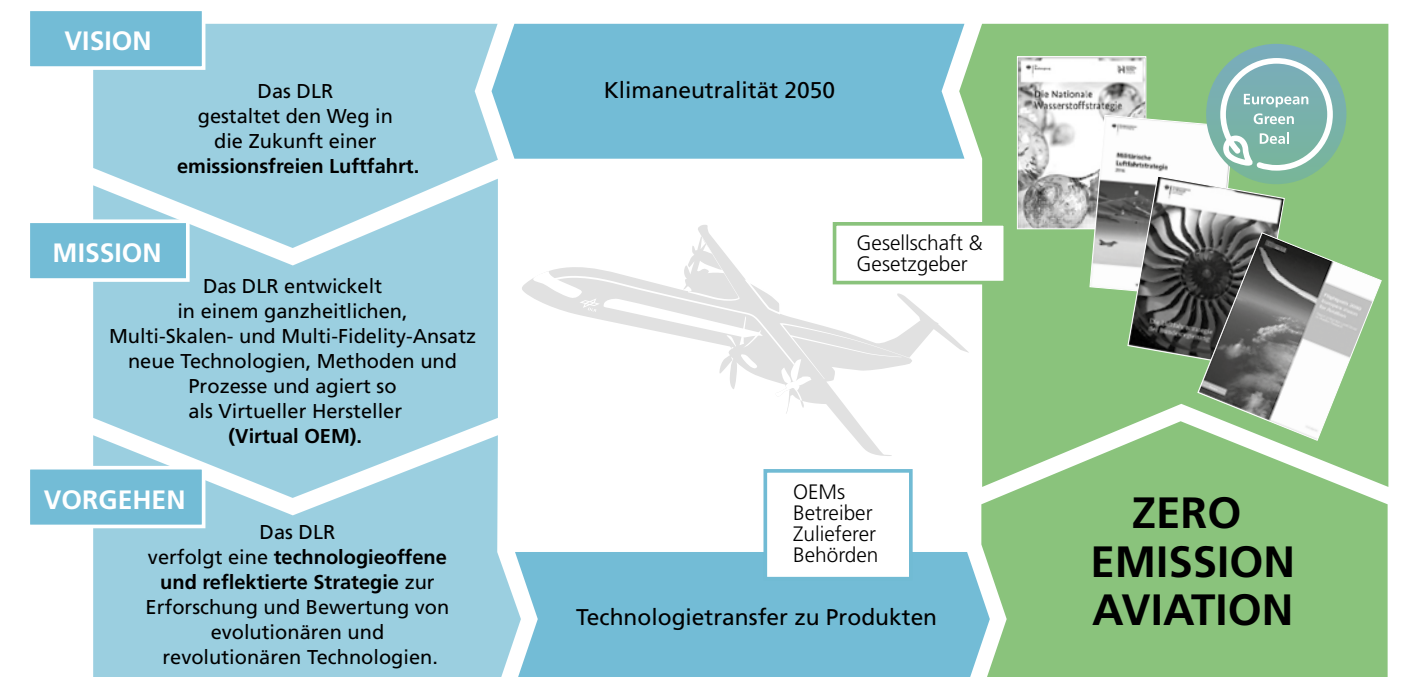


Abbildung 3: Zur Unterstützung des European Green Deals verfolgt das DLR die Vision einer emissionsfreien Luftfahrt. Das DLR agiert in diesem Sinne als virtueller Hersteller (Virtual OEM) und bringt seine Technologien, Methoden und Prozesse über Industrie- und Behördenkooperationen in die Anwendung.

*Der Weg hin zu einer klimaneutralen Luftfahrt ist möglich.
Die Luftfahrtforschung des DLR bereitet den Weg dazu
als virtueller Hersteller (Virtual OEM).*

Mission: das DLR als virtueller Hersteller

Das DLR entwickelt Multi-Skalen- und Multi-Fidelity-Technologien, Methoden und Prozesse, um Lösungen für eine möglichst emissionsfreie Luftfahrt zu liefern. Dabei verfolgt die DLR-Luftfahrtforschung einen ganzheitlichen Ansatz, um systemische Lösungen zu identifizieren. **Das DLR betrachtet immer das Luftfahrzeug und den Luftverkehr mit allen Hintergründen und Zusammenhängen als Gesamtsystem. Es übernimmt aufgrund dieser Systemkompetenz die Rolle eines virtuellen Herstellers (Virtual OEM) und bindet so auch andere Akteure der Luftfahrtforschung sowie Luftverkehrsindustrie und -wirtschaft ein.** Dabei greift das DLR auf seine Kompetenzen aus den Forschungsprogrammen Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr sowie den Querschnittsbereichen Digitalisierung und Sicherheit zurück.

Vorgehen: technologieoffene Transformation

Der Weg hin zu einer CO₂-neutralen Luftfahrt ist durchaus möglich, aber er bedarf einer schrittweisen und reflektierten Transformation sowie revolutionärer Technologien in allen Bereichen mit realistischen Zielen und unter Beachtung aller Randbedingungen und Zusammenhänge. Die DLR-Luftfahrtforschung hat zu diesem Zweck die hier beschriebene Forschungsstrategie entwickelt.

Neben evolutionären und revolutionären Flugzeug- und Antriebskonzepten spielen nachhaltige Luftfahrt-Brennstoffe und die Flugführung eine zentrale Rolle. Die erfolgreiche Einführung solcher Konzepte erfordert

eine transdisziplinäre Forschung unter Berücksichtigung von Technologie-, Betriebs- und Wirtschaftsfaktoren. **Die durchgängige Digitalisierung ist dabei ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Sie beschleunigt die Innovationsgeschwindigkeit, reduziert Entwicklungsrisiken und ermöglicht die schnelle Marktverfügbarkeit sowie neue Geschäftsmodelle.** In diesem Zusammenhang forscht das DLR am virtuellen Produkt – der Digitalisierung entlang des Flugzeuglebenszyklus, das heißt vom Entwurf über die Fertigung, die Zulassung und den Betrieb bis hin zur Ausmusterung. So können ökonomische und ökologische Auswirkungen frühzeitig und umfassend prognostiziert und bewertet werden.

Dieses Strategiedokument stellt die vier wesentlichen Themengebiete für eine klimaneutrale Luftfahrt und ihre Handlungsfelder zusammen mit den übergeordneten Zielen dar. Es ist das Ergebnis einer umfangreichen Abstimmung unter Einbezug aller Institute, des Vorstands und externer Interessenvertreter. **Der Kern der Strategie sind die in den wesentlichen Themengebieten aufgeführten Zeithorizonte mit ihren Herausforderungen, Lösungsansätzen und DLR-Alleinstellungsmerkmalen.** Die Ableitung und Umsetzung von konkreten Maßnahmen werden im Rahmen der programmorientierten Förderung in Projekten durchgeführt.

Neben der übergeordneten technologischen Strategie zum European Green Deal, die in diesem Dokument beschrieben wird, gehören zur Luftfahrtstrategie des DLR weitere wichtige Aspekte der Luftfahrtforschung. Bezüglich der militärischen Sicherheit werden beispielsweise Forschungs-

*Entscheidend ist der Transfer der Forschungsergebnisse in die Entwicklung neuer Flugzeug- und Lufttransportprodukte, um damit eine Marktdiffusion in die gesamte Flotte zu erreichen.
Diesen Transfer gestaltet das DLR auch über die Beratung und Unterstützung von der Politik und der Industrie aktiv mit.*

Das DLR betrachtet technologieoffen immer das gesamte Lufttransportsystem von der Materialentstehung über Entwicklung, Herstellung und Betrieb bis hin zur Außerdienststellung eines Flugzeugs.

ansätze für zukünftige Kampfflugzeuge und Flugkörper entwickelt. Jenseits der Flächenflugzeuge werden Hub-schrauber und Komponenten in kooperativen Drittmittelprojekten mit der Industrie erforscht, um die Industrie zu unterstützen und den Technologietransfer zu gewährleisten.

Darüber hinaus stärkt das DLR die Spitzenposition des Luftfahrtstandorts Deutschland durch Grundlagenforschung und sichert den Erhalt des Know-hows. Außerdem trägt das DLR dazu bei, Experten für die Luftfahrtbranche auszubilden.



WESENTLICHE THEMENGEBIETE

- **Emissionsarme Luftfahrtantriebe:** Innovative und disruptive Technologien, Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen die weitere Effizienzverbesserung und Minimierung der Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte, unter Beachtung der Leistungs- und Sicherheitsanforderungen.
- **Energieeffizientes Flugzeug:** Neue und hocheffiziente Flugzeugtechnologien ermöglichen es, den Energiebedarf erheblich zu senken. Ziel ist es, den Energiebedarf zukünftiger Flugzeuge so zu reduzieren, dass nur noch etwa die Hälfte der heutigen Antriebsleistung benötigt wird.

- **Emissionsreduziertes Lufttransportsystem:** Die Minimierung der Klimawirkung des Luftverkehrs durch eine Reduktion der CO₂- und insbesondere der Nicht-CO₂-Effekte ist essenziell. Sie kann durch eine effektivere Gestaltung des Lufttransportsystems nachhaltig unterstützt werden.
- **Digitalisierung:** Die Digitalisierung der Luftfahrt hat das Potenzial als Methodik, neue Lösungsansätze zeit- und kosteneffizienter zu entwickeln und zu bewerten, um die Transformation zur Klimaneutralität zu beschleunigen.

LÖSUNGSANSATZ DES DLR

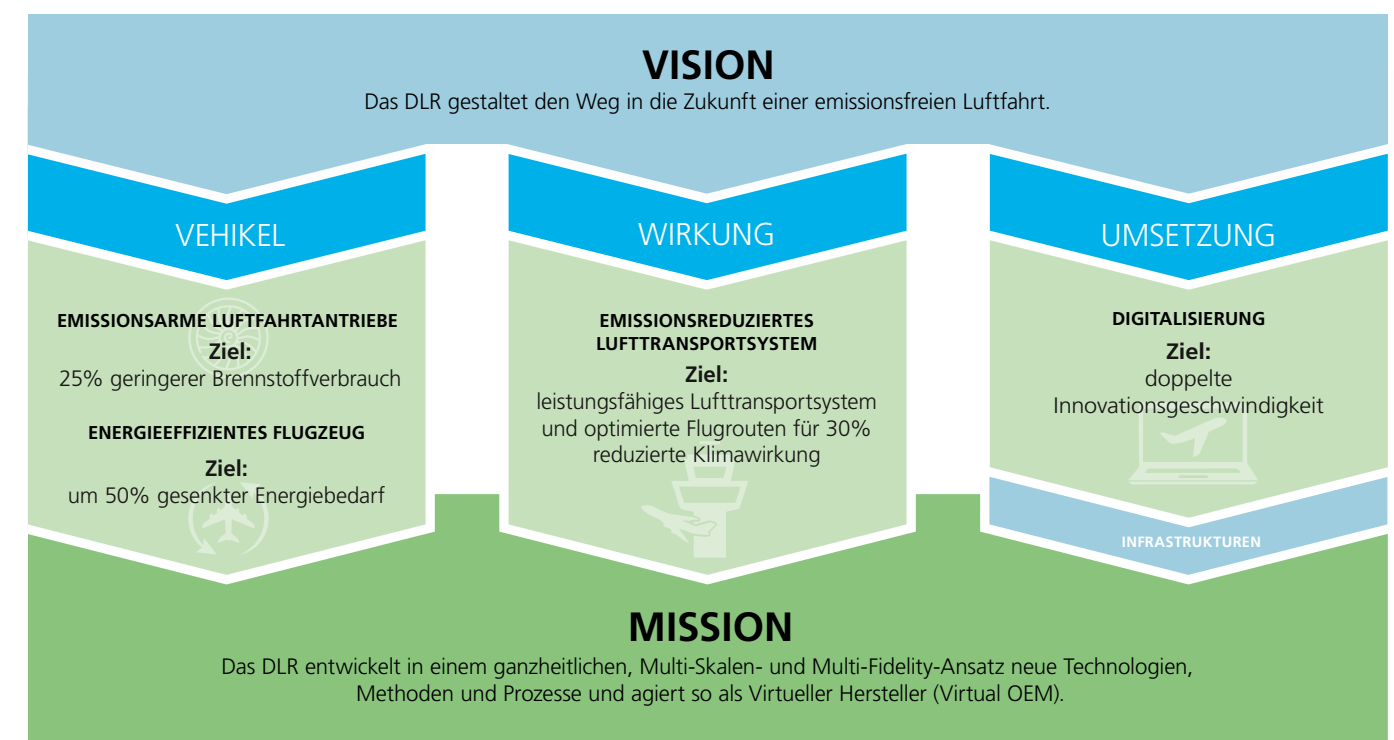


Abbildung 4: Um die Vision der emissionsfreien Luftfahrt umzusetzen, arbeitet das DLR in den vier wesentlichen Themengebieten emissionsarme Luftfahrtantriebe, energieeffizientes Flugzeug, emissionsreduziertes Lufttransportsystem und Digitalisierung.

3. Wesentliche Themengebiete



Um das Potenzial zur Emissionsminimierung zur Gänze auszuschöpfen, müssen neben der Erforschung revolutionärer Antriebstechnologien die evolutionären Luftfahrttechnologien zur Reduktion des aerodynamischen Widerstands und des Flugzeuggewichts bis an die Grenzen des technisch Machbaren vorangetrieben werden. Dadurch lässt sich eine massive Senkung des Energiebedarfs erreichen, wodurch neben der direkten

Reduktion von Emissionen der Einsatz alternativer Antriebskonzepte überhaupt erst ermöglicht wird. Weiterhin spielen die Erzeugung und Nutzung von regenerativ erzeugtem Kerosin eine entscheidende Rolle, denn dieses ist für alle Flugzeugklassen anwendbar und kurzfristig einsetzbar.

Die erreichbare Emissionsreduktion in 2050 durch Einsatz der verschiedenen Technologien ist in Abbildung 5 skizziert.



ANNAHMEN

- Die **Reduktion der CO₂-Emissionen** wird als gut zu messender Indikator verwendet. Lärm und Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen bleiben hier unberücksichtigt. Auch wenn diese Nicht-CO₂-Effekte den eigentlich größeren Teil der Klimawirkung verursachen, sind sie mit erheblichen Unsicherheiten verknüpft und zusätzlich gut mit klimaoptimierten Flugrouten, verbesserten Antriebstechnologien und der Nutzung nachhaltiger Energieträger mitigierbar.
- Zudem wird ein **Technologiereifegrad TRL 6 als Zielwert** betrachtet, um technologische Potenziale von Produkt- und Marktentwicklungen zu trennen, da diese von der Forschung nicht mehr zu beeinflussen sind. Dadurch werden Produktstrategien und die üblicherweise erheblichen Zeitverzögerungen bei der Einführung und Marktdurchdringung neuer Technologien nicht berücksichtigt.
- Das zugrunde liegende **Verkehrsszenario** basiert auf der Statistik des International Council on Clean Transportation (ICCT) für das Jahr 2019 mit dem Einsatz von 7 % Regionalflugzeugen, 51 % Kurz- und Mittelstrecken-Flugzeugen (überwiegend durch Schmalrumpf-Flugzeuge abgedeckt) und 42 % Langstrecken-Flugzeugen (überwiegend durch Großraumflugzeuge abgedeckt).
- Weiterhin wird angenommen, dass **Brennstoffzellen** aufgrund ihrer geringen Leistungsdichte nur für Regionalflugzeuge einsetzbar sind und die **Verbrennung von Wasserstoff (H₂)** aufgrund der großen Volumen- und Gewichtszuwächse für den integrierten H₂-Tank maximal für Kurz- und Mittelstrecken-Flugzeuge in Frage kommt.
- Das **Potenzial an CO₂-Reduktion der verschiedenen nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffe (Sustainable Aviation Fuel, SAF)** beträgt 100 % für Wasserstoff in Brennstoffzellen und Verbrennung sowie 80 % für die Verbrennung von regenerativ erzeugtem Kerosin. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Wasserstoffverbrennung zusätzlich zum Wasserdampf auch klimawirksame Stickoxide entstehen.
- Das **Potenzial an CO₂-Reduktion der energieeffizienten Technologien** im Flugwerk, im Triebwerk und in den Flugtrajektorien beträgt in Summe 3,4 % pro Jahr. Dies entspricht einer CO₂-Reduktion um 64 % bis 2050.
- Nach dem derzeitigen temporären Einbruch des Luftverkehrs durch die COVID-19-Pandemie wird von einer **vollständigen Erholung** ausgegangen.
- Für alle Technologieszenarien wurde angenommen, dass bis 2050 sowohl **regenerativ erzeugtes Kerosin als auch Wasserstoff in ausreichender Menge** zur Verfügung stehen, sodass diese nicht limitierend sind.

Für den klimaneutralen Luftverkehr der Zukunft identifiziert das DLR die optimale Kombination aller Technologien von der Effizienzverbesserung der Flugzeuge über hocheffiziente Antriebe in Kombination mit nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffen, Wasserstoff und Elektrizität bis hin zu einem verbesserten Luftverkehrsmanagement.

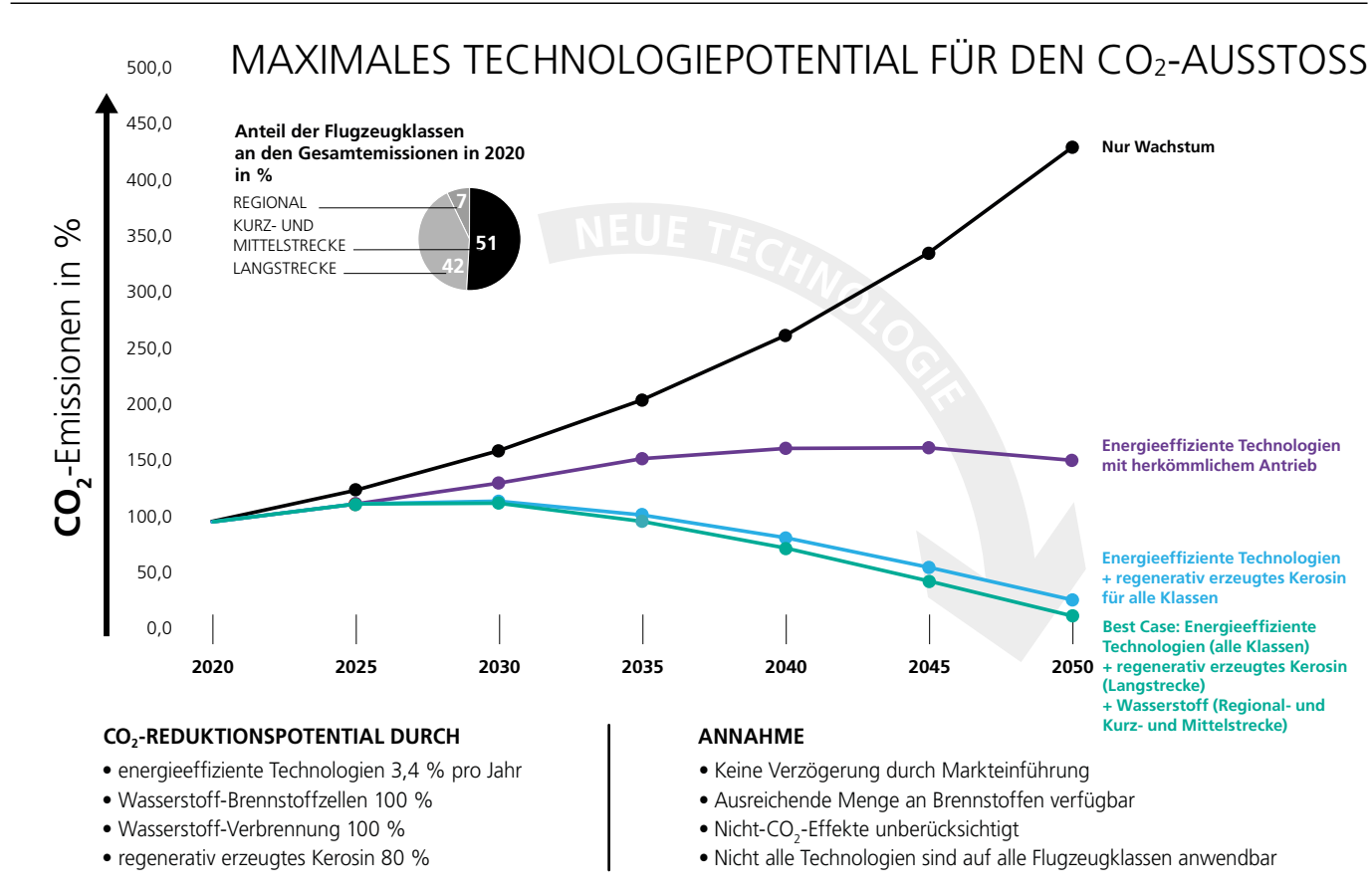


Abbildung 5: Über die Verbindung von energieeffizienten Technologien, regenerativ erzeugtem Kerosin und Wasserstoff lassen sich die Emissionen des Luftverkehrs von seinem Wachstum entkoppeln.

Regenerativ erzeugtes Kerosin

Für Langstrecken stellen Drop-In- und Near-Drop-In-Brennstoffe, also regenerativ erzeugtes Kerosin, aus heutiger Sicht die realistischste Alternative zu herkömmlichem Kerosin dar. Seine Entwicklung und der Einfluss auf die Atmosphäre werden im DLR – von Grundlagenversuchen bis hin zu Flugversuchen – erforscht und müssen weiter vorangetrieben werden. Werden alle Potenziale der im DLR erforschten Technologien genutzt, dann kann mit ihnen die CO₂-Belastung durch die Luftfahrt vom exponentiellen Verkehrswachstum entkoppelt und gegen Null gebracht werden. Dazu zählen neue, alternative Antriebstechnologien, energieeffiziente Technologien zur Reduktion des Energiebedarfs, neuartige Flugführungstrajektorien zur Minimierung der Klimawirkung und nachhaltige Luftfahrt-Brennstoffe in einem zukünftigen Lufttransportsystem. Die größte Hebelwirkung zur CO₂-Reduktion wird dabei aufgrund der Einsetzbarkeit für alle Flugzeugklassen durch die Kombination von energieeffizienten Technologien mit regenerativ erzeugtem Kerosin erreicht.

Alternative Energieträger

Für Regionalflugzeuge erforscht das DLR darüber hinaus weiterhin das Potenzial von Batterien und Brennstoffzellen zum Erreichen der notwendigen Leistungsdichte. Für Kurz- und Mittelstrecken-Flugzeuge entwickelt das DLR zudem Konzepte zur Wasserstoffverbrennung mit den erforderlichen Tanktechnologien und ermittelt damit das technische Potenzial von Antrieben auf Wasserstoffbasis. Die Verfügbarkeit einer Wasserstoffinfrastruktur und die sichere Handhabbarkeit von Wasserstoff sind dabei nicht Teil der DLR-Luftfahrtforschung, sondern werden komplementär in der DLR-Energieforschung untersucht. Ein wesentlicher Meilenstein auf dem Weg zur CO₂-Neutralität ist die zeitnahe Abwägung des Aufwands aller diskutierten Technologien gegen den Nutzen ihrer Emissionsreduktion, insbesondere unter Marktaspekten. Dabei muss auch der erhöhte Energie- und Kostenaufwand für die Herstellung von regenerativ erzeugtem Kerosin gegen den erhöhten Aufwand für den Einsatz von Wasserstoff im Luftfahrzeug abgewogen und in Marktszenarien detailliert werden.



WESENTLICHE ERKENNTNISSE

- Der CO₂-Ausstoß des weltweiten Luftverkehrs wird sich ohne korrigierende Maßnahmen und mit Flugzeugen nach heutigem Stand der Technik bis zum Jahr 2050 voraussichtlich mehr als vervierfachen.
- Setzt man alle technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs der Flugzeuge, der Entwicklung besonders effizienter Antriebe und zur Optimierung der Flugrouten um, so kann damit der Anstieg des CO₂-Ausstoßes auf nur noch 50 % gegenüber dem Stand von 2020 begrenzt werden.
- Werden die energieeffizienten Technologien mit der Einführung von regenerativ erzeugtem Kerosin kombiniert, so lässt sich damit bis 2050 eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes bereits auf nur noch knapp 30 % des Niveaus von 2020 erreichen.
- Kombiniert man alle derzeit realistischen Potentiale zur CO₂-Reduktion, dann ergibt sich aus heutiger Sicht für das Jahr 2050 ein minimaler Grenzwert von nur noch etwa 17 % CO₂-Ausstoß im Vergleich zu 2020.

Energieeffiziente Technologien

Um das Potenzial der energieeffizienten Technologien vollständig erschließen zu können, ist es zwingend erforderlich, den aerodynamischen Widerstand und das Flugzeuggewicht drastisch zu senken. Zur Reduktion des Reibungswiderstands muss dazu sowohl auf dem Flügel als auch auf dem Flugzeugrumpf ein laminarer Strömungszustand gewährleistet werden. Zur Reduktion des induzierten Widerstands muss die Spannweite des Flügels ohne Erhöhung der Flügelfläche extrem gesteigert werden. Das DLR wird Erforschung, Entwicklung und Demonstration dieser äußerst anspruchsvollen Technologien zur Realisierung der erforderlichen strömungsmechanischen, strukturellen und systemtechnischen Konzepte konsequent verfolgen.

Durchgängige Digitalisierung

Bei dem Versuch, den klimaneutralen Produktlebenszyklus eines Flugzeugs (von Entwurf über Produktion bis hin zu Betrieb, Wartung und schließlich Außerdienststellung) effizienter zu gestalten, spielt die durchgängige Digitalisierung der Luftfahrt eine wesentliche Rolle: Sie beschleunigt die Innovationsgeschwindigkeit und ermöglicht die schnellere Markverfügbarkeit neuer Technologien. In diesem

Zusammenhang forscht das DLR am sogenannten virtuellen Produkt – der durchgehenden Digitalisierung eines Flugzeugs mit allen seinen Komponenten und Technologien entlang seines Lebenszyklus. Damit können ökonomische und ökologische Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus frühzeitig und umfassend prognostiziert und bewertet werden. Zudem können die Potenziale neuer Technologien für einen umweltfreundlicheren und wirtschaftlicheren Luftverkehr identifiziert und deren Einführung beschleunigt werden.

Gesamtsystembewertung

Für den klimaneutralen Luftverkehr der Zukunft stellt das DLR statt einer festgelegten Langzeitprognose die Weichen für eine technologieoffene, reflektierte Forschungsstrategie: Nach maximal fünf Jahren wird das DLR alle Technologien bewerten und diejenigen verstärkt weiterverfolgen, die im gesamten Lebenszyklus bestmöglich zur Reduktion der Umweltbelastungen durch die Luftfahrt beitragen, speziell im Hinblick auf Brennstoffzellen und Wasserstofftanks. Die Forschungsschwerpunkte werden somit stets entsprechend aktuellen Erkenntnissen angepasst und am Potenzial des Technologietransfers ausgerichtet.

Für Mittel- und Langstreckenflüge erlauben hocheffiziente Luftfahrtantriebe in Kombination mit nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffen bereits kurzfristig einen weitgehend klimaneutralen Betrieb. Ziel ist es, bis zum Jahr 2050 den Brennstoffbedarf der Antriebe um weitere 25 % zu senken.

Emissionsarme Luftfahrtantriebe



ZIEL UND BEDEUTUNG

Derzeit wird der Einsatz von alternativen Energieträgern untersucht, zum Beispiel Turboantriebe mit regenerativ erzeugtem Kerosin, Turboantriebe mit Wasserstoff als Energieträger, Brennstoffzellen-Hybridantriebe mit Wasserstoff oder batterie-elektrische Antriebe. Nachhaltige Energieträger werden für die Erreichung der Emissionsziele unabdingbar sein. Das genaue Potenzial und die Einsetzbarkeit der unterschiedlichen Technologien für unterschiedliche Flugzeugkategorien und Flugmissionen sind jedoch bisher unklar.

Effizientere Antriebstechnologien sind in diesem Zusammenhang notwendig, weil der Energieverbrauch im Antriebssystem

direkt mit den erzeugten Emissionen verknüpft ist, nachhaltige Luftfahrt-Brennstoffe zunächst knapp und deutlich teurer als fossile Brennstoffe sein werden und insbesondere bei Wasserstoffverbrennung die Tankvolumina und das Tankgewicht den Einsatzbereich limitieren werden.

Das Ziel emissionsarmer Antriebstechnologien ist es, Luftfahrtantriebe vom derzeit bereits sehr hohen technologischen Stand bis zum Jahr 2050 für nochmals ca. **25 % geringeren Brennstoffverbrauch** und für die Nutzung von nachhaltigen Brennstoffen zu entwickeln.

Herausforderungen, Lösungsansätze, Alleinstellungsmerkmale
Um Emissionen und die Klimawirkung des Luftverkehrs möglichst kurzfristig und nachhaltig zu reduzieren, ist es notwendig, fossile Brennstoffe durch regenerativ erzeugtes Kerosin zu ersetzen. Bereits existierende Flugzeuge können diese mit nur geringen technischen Modifikationen (Near-Drop-In-Brennstoffe) oder komplett ohne Modifikationen (Drop-In-Brennstoffe) problemlos nutzen, sodass eine schnelle Marktdurchdringung ermöglicht wird. **Die Herstellung von regenerativ erzeugtem Kerosin sollte dazu forciert, internationale Partnerschaften, Investitions- und Bereitstellungsmodelle sollten etabliert und kostengünstige Produktionsmethoden entwickelt werden.**

Um die Emissionen und den notwendigen Primärenergieeinsatz darüber hinaus weiter zu reduzieren, ist es notwendig, auch Wasserstoff als Energieträger für Luftfahrtanwendungen zu untersuchen und die Antriebe für die Wasserstoffverbrennung zu qualifizieren. **Dies erfordert eine systematische Erforschung und Entwicklung von sicheren, zuverlässigen und schadstoffarmen Wasserstoffbrennern sowie eine sichere Handhabung und Beherrschung von Wasserstoff und einem erhöhten Wasserdampfanteil im Heißgasbereich.**

In einem weiteren Schritt sollen hybrid-elektrische Luftfahrtantriebe unter Einsatz von Wasserstoff in Brenn-

stoffzellen und der Nutzung des elektrischen Stroms in Hochleistungselektroantrieben erforscht werden. Der bisher erreichte Technologiereifegrad, die Leistung und Leistungsdichte sind jedoch noch nicht ausreichend, um damit größere zivile Verkehrsflugzeuge betreiben zu können. Batterien werden für den kurzfristigen hohen Leistungsbedarf in kritischen Flugphasen (vor allem Start- und Steigflug sowie Durchstarten nach Landeabbruch) untersucht. Weitere batterie-elektrische Anwendungen werden für zunehmend größere Flugzeuge und für ausgedehntere Flugmissionen entwickelt.

Technische Ziele
Insbesondere für die Mittel- und Langstreckenflugzeuge, aber auch zur Erreichung einer schnellen Marktdurchdringung im Kurzstreckenbereich ist es bis 2030 zunächst vordringlich, **alle Flugzeuge, die über 2030 betrieben werden sollen, mit zu 100 % SAF-fähigen Antrieben auszustatten.** Dies gilt insbesondere für regenerativ erzeugtes Kerosin. Dabei müssen extrem hohe Anforderungen an die schadstoffarme Verbrennung von nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffen (z. B. NO_x, Ruß) gestellt werden, sodass die **Erforschung und Entwicklung innovativer Verbrennungssysteme für die veränderte chemische Zusammensetzung von SAF** höchste Priorität genießen soll. Damit lassen sich – neben den Netto-CO₂-Emissionen – auch die Stickoxid- und Rußemissionen drastisch reduzieren, sodass die Wirkung des Luftverkehrs auf das Klima und auf die Luftqualität damit sehr effektiv vermindert werden kann.

Wasserstoff-, Brennstoffzellen- und Batterie-Antriebe sind wegen des großen Einflusses auf Volumen und Gewicht des Flugzeugs und der entsprechend geringen zur Verfügung stehenden Energiemenge zunächst vor allem für kleine Flugzeuge bis zur Regionalklasse interessant.

Zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs von Turboantrieben müssen **neuartige Werkstoffe und Bauweisen** erforscht und qualifiziert und zur Entwicklung von hocheffizienten Antriebskomponenten eingesetzt werden. Dies erfordert aufgrund der veränderten Charakteristika **innovative Designansätze und angepasste Auslegungsregeln.** Hochgenaue Simulationsverfahren und virtuelle Systeme sind dafür prädestiniert und ermöglichen eine stark verkürzte Entwicklungszeit und erhebliche Risikoreduzierung.

Gleichzeitig muss die **sichere und schadstoffarme Verbrennung von Wasserstoff** in dafür speziell zu entwickeln den Wasserstoffbrennern erforscht und qualifiziert werden. Dazu müssen die dafür notwendigen Prüfstände vollständig wasserstofffähig sein und es muss die gesamte Kette von atmosphärischen Tests an Einzelbrennern bis hin zu Vollringtests unter realistischen Temperatur- und Druckbedingungen abgebildet werden. **Bis 2040 können erste wasserstofffähige Flugzeuge und Antriebe für Mittelstreckenflugzeuge entwickelt werden.** Damit ist es dann möglich, den Mittelstreckenverkehr nahezu CO₂-neutral zu gestalten und somit die Klimawirkung auch in diesem wichtigen Verkehrsegment zu minimieren.

Für den mittelfristigen Einsatz von brennstoffzellen-elektrischen Antrieben in Flugzeugen ist im ersten Schritt bis 2030 ein solcher Antrieb in der 1- bis 2-MW-Leistungsklasse zu konzipieren, eingehend zu erforschen und unter Höhenbedingungen zu testen. Dazu ist es notwendig, neben der **Wasserstoffinfrastruktur auch einen geeigneten höhentauglichen Triebwerksprüfstand verfügbar zu machen**, mit dem eine komplette Flugenveloppe am Boden simuliert werden kann. Nur damit können Defizite frühzeitig erkannt und Risiken für spätere Flugversuche im Vorfeld eliminiert werden. Darüber hinaus müssen Hochleistungselektroaggregate für Fluganwendungen entwickelt und validiert und die elektromagnetische Verträglichkeit aller elektrischen und elektronischen Systeme sichergestellt werden. Auch dafür müssen spezielle Testeinrichtungen aufgebaut werden.

Im Regionalflugverkehr können bis 2040 erste Brennstoffzellen-Elektroantriebe diese gesellschaftlich besonders infrage gestellten Flugmissionen vollkommen klimaneutral gestalten. Dazu ist es notwendig, die Leistungsdichte sowohl der Brennstoffzellen als auch aller Elektrokomponenten deutlich zu verbessern und hochintegrierte Antriebseinheiten zu entwickeln, die mit vertretbaren Einschränkungen in Flugzeuge integriert werden können.

EMISSIONSARME LUFTFAHRTANTRIEBE
HANDLUNGSFELDER

	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Turbo-Antriebe	Innovative Composite-Werkstoffe, optimierte SLM-Bauteile, aktive Schallminderung und schadstoffarme SAF-Verbrennung	Triebwerke mit innovativer Fan- und Turbinenbeschauelung und offene Rotoren mit 100% Wasserstoff-Verbrennung	UHBR-Triebwerke und offene Rotoren mit schadstoffarmer Wasserstoff-Verbrennung verfügbar
Elektrische Komponenten	Hochleistungskomponenten entwickelt und elektromagnetische Verträglichkeit im Prüfstand validiert	Leistungssteigerung und erhöhte Leistungsdichte im Prüfstand validiert	Verbesserte Systemarchitektur, weitere Leistungssteigerung und erhöhte Leistungsdichte im Prüfstand validiert
Verteilter Schub	Optimierung und virtuelle Integration von Antrieben mit verteiltem Schub	Experimenteller Nachweis von Antriebskonzepten mit verteilt. Schub	Gesamt-Konfigurationen mit verteiltem Schub einsatzbereit
Brennstoffzellen	Luftfahrt-taugliche Brennstoffzellen-Stacks mit erhöhter Leistung verfügbar und in Langzeittests validiert	Luftfahrt-optimierte Brennstoffzellen-Stacks weiter entwickelter Bauart und erhöhter Leistung verfügbar und in Langzeittests validiert	Luftfahrt-optimierte Brennstoffzellen-Stacks weiter entwickelter Bauart und erhöhter Leistung einsatzbereit
Hybrid-elektrische Brennstoffzellen-Antriebe	Brennstoffzellen-Elektro-Antriebe entwickelt und im Höhenprüfstand erprobt	Hoch integrierte Brennstoffzellen-Elektro-Antriebe entwickelt und im Höhenprüfstand erprobt	Hoch integrierte Brennstoffzellen-Elektro-Antriebe einsatzbereit
Revolutionäre Antriebe	Komponenten revolutionärer Antriebe entwickelt und im Prüfstand erprobt	Integriertes revolutionäres Antriebskonzept im Prüfstand validiert	Revolutionäres Antriebskonzept im Höhenprüfstandvalidiert
Wasserstofftechnologie	Konzept zur sicheren Speicherung und Einsatz von Wasserstoff in Flugzeugen entwickelt und validiert	Numerische Methoden zur Bewertung der Auswirkung von Wasserdampf-korrosion und Versprödung validiert	Integriertes Konzept für Kryotechnologie / Supraleitung entwickelt und validiert
Digitalisierung & Virtualisierung	Virtuelles Triebwerk für den multidisziplinären Triebwerksentwurf einsetzbar	KI für Modellierung und prognosefähige Digitale Zwillinge einsatzbereit	Simulationsbasierte Zertifizierung von Triebwerkskomponenten und Triebwerken

Abbildung 6: Die Handlungsfelder im Gebiet emissionsarme Luftfahrtantriebe liegen unter anderem bei Turbo-Antrieben, elektrischen Komponenten, der Nutzung von Wasserstoff. In allen Feldern wichtig sind zudem Integrationsfragen.

Energieeffizientes Flugzeug



ZIEL UND BEDEUTUNG

Es gilt, den Energiebedarf zukünftiger Flugzeuge so zu reduzieren, dass nur noch die Hälfte der heutigen Antriebsleistung benötigt wird. Ziel ist es, alle etablierten Technologien des Flugzeugbaus mithilfe neuer Erkenntnisse und Methoden weiter bis an die Grenzen des physikalisch und technisch Machbaren zu treiben. Ein geringerer Energiebedarf des Flugzeugs wirkt sich direkt in einem geringeren Verbrauch der Antriebssysteme aus, reduziert Restemissionen und kompensiert die höheren Kosten künftiger Energieträger. Um alle notwendigen Technologien optimal integrieren zu können, müssen sie in der Auslegung neuer Flugzeugkonfigurationen bereits ganz zu Beginn in der Entwurfsphase berücksichtigt werden. Eine besondere

Herausforderung stellen dabei bisher nicht erprobte Verknüpfungen von Einzeltechnologien der Aerodynamik, Aeroelastik, Struktur und Systeme zur Widerstandsreduktion, Lastminderung und Gewichtsreduktion dar.

Ziel des energieeffizienten Flugzeugs ist es, den **Energiebedarf bis 2050 um bis zu 50 % zu senken**. Dies kann nach aktuellen Erkenntnissen über eine Reduktion des aerodynamischen Nullwiderstands um 40 %, eine Reduktion des Gesamtgewichts um 10 % und durch eine Steigerung der Flügelstreckung auf bis zu 15 erreicht werden.

Herausforderungen, Lösungsansätze, Alleinstellungsmerkmale

Auf der einen Seite sind Flügel mit **signifikant höherer Streckung** erforderlich, um den bei der Auftriebserzeugung entstehenden induzierten Widerstand deutlich zu senken. Weiterhin ist die **Laminarhaltung** zur Reduktion des Reibungswiderstands auf den Flügel anzuwenden und zwingend auf den Rumpf zu erweitern; mit weitreichenden Auswirkungen auf Tragstrukturen und Systeme. Auf der anderen Seite sind bekannte **Leichtbaupotenziale** konsequent zu nutzen und zu optimieren, **Lastreduktionsmethoden** mit neuartigen Sensor- und Regelungskonzepten zu verbinden, die sensorische **Strukturüberwachung** zu implementieren und neue Leichtbauweisen zu entwickeln und zu erproben, die eine maximale Beteiligung von Sekundärstrukturen und Systemelementen an der Lastabtragung ermöglichen. Um eine effektive Technologieintegration zu erreichen, sind etablierte **Flugzeugkonfigurationen** gezielt zu verbessern und bei neuartigen Energieträgern, wie Wasserstoff, auch grundlegend neu zu entwickeln. Für ein präzises und robustes Zusammenwirken aller Disziplinen ist die **konsequente Anwendung der numerischen Simulation in Verbindung mit der multidisziplinären Optimierung** eine unbedingt notwendige Voraussetzung.

Diese Lösungsansätze verfolgt das DLR, um die genannten Herausforderungen zu bewältigen:

- Schaffung eines dualen und abgestimmten Weges von **virtueller und physischer Entwicklungs- und Erprobungsumgebung** für neue zuverlässige und validierte Gesamtflugzeugsysteme

Das DLR verfügt über alle notwendigen Forschungs- und Entwicklungskompetenzen für die erforderlichen energieeffizienten Luftfahrttechnologien. Zudem kann das DLR die Technologieentwicklungen sowohl mit Fertigungseinrichtungen im Industriemaßstab, mit Prüfständen, Windkanälen als auch mit Forschungsflugzeugen demonstrieren. Das DLR hat praktische Erfahrung in der Durchführung komplexer,

Für alle Flugzeugklassen ist es zusätzlich zur Verbesserung der Antriebe unerlässlich, Widerstand und Gewicht so weit wie möglich zu reduzieren. Ziel ist eine Halbierung des Energiebedarfs bis zum Jahr 2050.

großskaliger Flugversuche und kann Technologien und digitale Modelle an einer Flotte unterschiedlichster Forschungsflugzeuge validieren. **Das DLR besitzt damit die Fähigkeit und die Werkzeuge zur Erforschung und Entwicklung von Systemarchitekturen bis zu einem industriellen Technologiereifegrad.**

Technische Ziele

Für **Flügel mit sehr hoher Streckung** (≈ 15) sind strukturelle, systemtechnische und konfigurative Maßnahmen zu entwickeln (passive Lastadaptation, aktive Lastkontrolle, Abstreben) und bis 2030 technisch so zu konsolidieren, dass **bis 2040 die Zulassungs- und Serienreife** erreicht wird.

Die Technologien für einen **Laminarflügel** (mit Hochauftrieb, Reinhaltung und Enteisierung) im Bereich von $Ma > 0,75$ sowie für die hybride Laminarhaltung auf dem Rumpf sind im Flugversuch bis 2040 derart zu demonstrieren, dass der **serielle Einsatz ab 2040** möglich wird.

Multidisziplinärer Systemleichtbau unter Ausnutzung von modernen Leichtbauwerkstoffen, neuartigen Fügekonzepten, Structural Health Monitoring (SHM), System- und Kabinenintegration, Einbeziehung von Sekundärstrukturen, Lastreduktion sowie mit den Fähigkeiten, die Laminarhaltung der Strömung passiv und aktiv zu beeinflussen, ist bis 2030 in bodengebun-

denen Demonstratoren zu erproben und **bis 2040 in Flugversuchen zur Zulassungsreife** zu bringen. Parallel sind die notwendigen Fertigungstechnologien für eine solche Integrationsdichte von Strukturen und Systemen weiterzuentwickeln.

Bis 2030 müssen die **Technologien der Lastadaption** nachgewiesen, Flatter- und Flugdynamikkontrolle demonstriert und KI-basierte Sensor- und Systemkonzepte etabliert, bis 2040 in der Flugerprobung optimiert und zugelassen und **ab 2040 fester Bestandteil künftiger Auslegungen energieeffizienter Flugzeuge sein**.

Technologiekonzepte zur Integration von H₂-Tanks und -Systemen im Flugzeug sind bis 2030 entwickelt und erprobt, sodass einer Zulassung von Flugzeugen auf Basis von H₂ als Energieträger nichts mehr im Wege steht.

Die Fähigkeit zum schnellen multidisziplinären Entwurf von Gesamtflugzeugen ist zügig auszubauen, sodass **bis 2030 geeignete Flugzeugkonfigurationen für alternative Antriebskonzepte** (verteilte Antriebe, Grenzschichtabsaugung, Integration von Wasserstofftanks) ermittelt und die Integration von Technologien zur Leistungsverbesserung (Flügel großer Streckung, Laminarhaltung auf Flügel und Rumpf) virtuell erprobt werden können.

ENERGIEEFFIZIENTES FLUGZEUG
HANDLUNGSFELDER

	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Widerstandsreduktion	Laminarhaltung am Flügel, Flügel hoher Streckung, Flügelendform, Turb. Strömungskontrolle erforscht	Laminarhaltung auf Rumpf & Tanks, Beherrschung turbulenter Strukturen Demonstration hochgestreckter Flügel	Auslegung von Flugzeugen mit optimierter laminar/turbulenter Strömung ist Routine im Entwurf
Gewichtsreduktion durch Leichtbau	Potentielle funktionen-integrierender Strukturen ermittelt inkl. Formvariabilität, Condition-Mon., Energiespeicher, Systemintegration etc.	Neue Material-, Struktur- und Fertigungskonzepte prototypisch im Flug nachgewiesen, LCA und Oel-Bewertung in Design integriert	Funktionsintegrierte Strukturbauweisen im Ultraleichtbau zugelassen, produktions-technisch und industriell beherrscht.
Kontrolle von Stabilität und Belastung	Lastadaption nachgewiesen, Flatter- und Flugmechanikkontrolle demonstriert, KI-basierte Sensor- und Systemkonzepte	KI-Sensorbasierte Kontrolle des Gesamtsystems Flugzeug (Flugzustand, Stabilität, Belastung)	Bestmögliche Kombination von Last-/Energiereduktion ist industrielle Komponente neuer Flugzeuge
Optimierung der Bordsysteme	elektrische Flugsteuerungssysteme inkl. lastadaptiven Flügel verfügbar.	KI Zustandsüberwachung mit hoher Zuverlässigkeit umgesetzt und im Flug bewertet. KI optimierte elektrische Lastverteilung.	Supraleitende Technologien für Energieverteilung/ Antrieb. Zuverlässige Morphing Flaps etc.
Propulsor-Integration	Vortriebstechnologien (UHBR, Propeller) bewertet, kritische hybrid-elekt. Systemkomponenten beherrscht	Systemarchitekturen für elektr., hybrid-elektrische & nicht-elekt. Antriebe nachgewiesen; UHBR für SAF und H ₂	Konfigurationen zur Integration revolutionärer UHBR-Antriebe optimiert und digital erprobt
H ₂ -Tanktechnologien	Konzepte zur substantiellen Erhöhung des gravimetrischen Index und robusten Fertigung prototypisch erprobt	Gewichts-optimale Integration großer H ₂ -Tanks in das Flugzeug im Entwurf und in der Anwendung beherrscht	Kostenoptimale Produktion von gravimetrisch hochwertigen H ₂ -Tanks ist industrielle Routine
Kühlkonzepte für Brennstoffzellen und elektrische Systeme	Kühlkonzepte erstellt, Auswirkungen auf Flugzeug-Konfigurationen ermittelt	Funktion und Umsetzbarkeit von Kühlkonzepten im Mega-Watt Bereich nachgewiesen	Integration von Kühlkonzepten ist normaler Bestandteil der Flugzeugentwicklung
Konfigurationen	Optimale Konfigurationen für unterschiedliche Antriebskonzepte und Missionen digital erprobt	Erprobung von Zielkonfigurationen mit „Scaled Demonstrators“ und Inflight Simulation	Nachweis der „Green Function“ durch Schadstoff- und Verbrauchs-Vermessung von unterschiedlichen Missionen

Abbildung 7: Die Handlungsfelder im Gebiet des energieeffizienten Flugzeugs liegen insbesondere in der verknüpften Betrachtung von Aerodynamik, Aeroelastik, Struktur und Systemen.

Insbesondere auf der Mittel- und Langstrecke lassen sich die Klimaeffekte der Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs mit optimierten Flugrouten erheblich reduzieren. Ziel ist eine Reduktion der Klimawirkung um 30 %.

Emissionsreduziertes Lufttransportsystem



ZIEL UND BEDEUTUNG

Der Betrieb von Flugzeugen bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen in Flughafennähe und im Flug sowie zur Minimierung der gesamten Klimawirkung (CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte). Die Optimierung von lateralen und vertikalen Flugprofilen ist ein vielversprechender Weg, um Effizienzgewinne zu erzielen. Zudem kann die Flugführung so gestaltet werden, dass die von atmosphärischen Bedingungen abhängige Auswirkung der Emissionen durch klimaoptimierte Routen minimiert werden kann. Klimawirkungsoptimierte Flugtrajek-

torien versprechen insbesondere auf der Mittel- und Langstrecke eine deutliche Reduktion des Anteils der Luftfahrt an der Klimaerwärmung.

Ziel ist es daher, ein möglichst **leistungsfähiges und emissionsreduziertes Lufttransportsystem** zu ermöglichen, das neuartige Flugzeugkonfigurationen integrieren und durch klimaoptimierte Routenführung mehr als 30 % der Klimawirkung des Luftverkehrs über die Minimierung der Nicht-CO₂-Effekte reduzieren kann.

Herausforderungen, Lösungsansätze, Alleinstellungsmerkmale

Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, müssen einige technologische Herausforderungen in diesem Bereich gemeistert werden. Das Lufttransportsystem und hier insbesondere die Flugsicherungslandschaft sind geprägt durch eine auf nationale Grenzen ausgerichtete Organisationsstruktur mit entsprechender betrieblicher Fragmentierung und einem deutlich niedrigen Automatisierungsgrad. Die Initiative des Single European Sky (SES) hat hierzu mit ihrem Programm SESAR (SES ATM Research) das Ziel, notwendige innovative, robuste und sichere Technologien und Betriebsverfahren zu entwickeln. Ein solch umfassendes europäisches Programm existiert bisher nicht zur betrieblichen und technologischen Abdeckung der Minimierung der Klimawirkung des Luftverkehrs durch Reduktion der CO₂- und insbesondere der Nicht-CO₂-Effekte. **Die Gesamtwirkung aller klimaschonenden Technologien kann nur auf Lufttransportsystemebene beobachtet werden**, aber die Fähigkeit zur Gesamtbewertung von neuen Technologien, Betriebsverfahren und Treibstofftechnologien im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit des Lufttransportsystems, aber auch auf die Möglichkeiten zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs **ist bislang nicht umfassend durch eine entsprechend detaillierte Bewertungs- beziehungsweise Simulationsplattform gegeben**.

Um diese Hürden zu bewältigen, erforscht das DLR ganzheitlich neue Konzepte und Technologien für das Lufttransportsystem von morgen. Die Forschung umfasst die **Entwicklung**

von operationellen Konzepten und neuen Technologien für neue integrierte Betriebsverfahren aus den Bereichen Kommunikation, Navigation, Überwachung (Communication, Navigation and Surveillance, CNS) und Flugverkehrsmanagement (Air Traffic Management, ATM) inkl. Security mit optimaler Nutzung von **höheren Automatisierungsgraden**. Ebenfalls erforscht wird der Einsatz von Performance-based Operations bis hin zur Bestimmung und Nutzung von Klimakostenfunktionen zur Minimierung der Klimawirkung des Luftverkehrs und zu integrierter CNS inklusive der erforderlichen Security. Die **Entwicklung von neuen und „smarten“ Konzepten für Flughäfen sowie eines emissionsfreien urbanen Luftverkehrs (Urban Air Mobility, UAM)** soll auch dazu beitragen, Emissionen wie Schwefel- und Stickoxide oder Feinstaub in Flughafennähe zu reduzieren. **Im Fokus steht zudem der Ausbau einer umfassenden und sehr detaillierten Bewertungsumgebung für das gesamte Lufttransportsystem**. Das DLR beherrscht das Thema des klimaneutralen Luftverkehrsmanagements inklusive UAM, von Smart-Airport-Konzepten und das notwendige Impact Assessment in allen Entwicklungsstufen, beginnend bei der Grundlagenforschung bis hin zur Erstellung anwendungsnaher Prototypen. Das DLR betrachtet sowohl die erforderlichen Konzepte für ein umfassendes Verkehrsmanagement und die Auswirkungen auf das Klima als auch notwendige Einzeltechnologien zur Kommunikation, Navigation, Flugführung oder Wettervorhersage in großer Detailtiefe.

Im Zusammenspiel von emissionsarmen Luftfahrtantrieben mit nachhaltigen Luftfahrtbrennstoffen, energieeffizientem Flugzeug und dem emissionsreduzierten Lufttransportsystem kann das Wachstum des Luftverkehrs von den Emissionen entkoppelt werden.

Technische Ziele

Geplant ist der **Ausbau einer umfassenden und detaillierten Simulationsplattform für das gesamte Lufttransportsystem**, die auch eine Klimabewertung von Technologien und Betriebsverfahren ermöglicht, innerhalb von vier Jahren, um technologische Lösungspfade aufzuzeigen und ganzheitlich zu bewerten. Außerdem ist der **Aufbau eines formellen Dialogs mit der Politik** nötig, um die Wechselwirkungen zwischen politischen Maßnahmen, den technologischen Entwicklungspfaden und deren Klimawirkung aufzuzeigen.

Weiterhin ist die **Definition einer umfassenden, validierten und robusten Klimawirkungsfunktion** unabdingbar, die den atmosphärischen Unsicherheiten der Nicht-CO₂-Effekte Rechnung trägt und die in einem leistungsorientierten Lufttransportbetrieb einsetzbar ist. So will das DLR in den nächsten fünf Jahren die kommerzielle Umsetzbarkeit und Wirksamkeit der **Reduktion von Nicht-CO₂-Effekten durch klimawirkungsoptimierte Flugtrajektorien** nachweisen.

Letztlich muss die Zusammenarbeit zwischen Forschung, Industrie und Politik gefördert werden, um in den nächsten fünf Jahren **globale, ganzheitliche Standards und Maßnahmen** zu entwickeln, die die Auswirkung künftiger Pandemien besser mindern können.

EMISSIONSREDUZIERTES LUFTTRANSPORTSYSTEM
HANDLUNGSFELDER

	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Klimawirkungsoptimierte Flugtrajektorien	Strahlungsantrieb für klassische Antriebe verstanden und Klimakostenfunktion in Trajektorienplanung integriert	Klimawirkung von neuen H ₂ -Antriebstechnologien verstanden	Klima- und ökoeffiziente Trajektorien vollständig umgesetzt
Automatisierung Luftverkehrsmanagement (ATM)	Höhere Produktivität und Kapazität durch Automation nachgewiesen	Schrittweise operationelle Umsetzung auch von disruptiven Verfahren	Vollautomatisierung im Luftverkehrsmanagement (ATM) möglich
Zero Emission Urban Air Mobility (UAM)	UAM Verkehrsmanagement entwickelt (Lärm- und Emissionsoptimiert)	Volle Luftraumintegration nachgewiesen und soziale Akzeptanz etabliert	Volle Integration von UAM mit allen Verkehrsmoden
Zero Emission Airport	Lärmoptimierte Trajektorien (24/7) für An- und Abflug, Zero-Emission Taxiing demonstriert, Luftqualität erfasst und Einfluss von Ultrafeinpartikeln (UFP) nachgewiesen	Automatisierter Flughafen (Airside) möglich (Performance Based Airport Management), Minderungsstrategien für Luftschadstoffe entwickelt und umgesetzt	Klimaneutraler Flughafenbetrieb erreicht
Multimodale Verkehrsanbindung	Klimawirkung unterschiedlicher Verkehrsmoden für Referenzreisen verstanden	Moden-übergreifendes Verkehrsmanagement entwickelt	Nahtlose 4D-Passagiertrajektorie etabliert
Impact Assessment (Wirkung)	Modellierung auf Aircraft/Mission, Airport/ATM und Air Transport Level verfügbar und Empfehlungen für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft abgeleitet	Wechselwirkungen mit anderen Transportmoden / Intermodalität verstanden und bewertet	Luftverkehr erreicht Klimaziele

Abbildung 8: Die Handlungsfelder im Gebiet des Lufttransportsystems lassen sich zusammenfassen mit der Gesamtbewertung des Systems und insbesondere der Ermöglichung klimaoptimierter Flugrouten.

Digitalisierung



ZIEL UND BEDEUTUNG

Die Digitalisierung spielt als Querschnittstechnologie eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, die ambitionierten Entwicklungen in der Luftfahrt zu ermöglichen, ohne die ein Erreichen der Klimaziele im Jahr 2050 nicht gewährleistet ist. Zum einen wird es nur durch konsequente Digitalisierung möglich sein, die unterschiedlichen Disziplinen, Technologien und Elemente des Lufttransportsystems derart aufeinander abzustimmen, dass die notwendigen Fortschritte zur Reduktion von Emissionen und Energiebedarf auf Gesamtsystemebene überhaupt möglich werden. Zum anderen sind die herkömmlichen Entwicklungszyklen in der Luftfahrt mit einem hohen

zeitlichen Aufwand sowie enormen technischen und finanziellen Risiken verbunden. Durch die weitestgehende Virtualisierung der Entwicklung und die durchgängige Digitalisierung von Produktion und Betrieb werden Entwicklungszeiten und -risiken signifikant reduziert, Betriebsabläufe optimiert und die Klimawirkung des Luftverkehrs entscheidend minimiert.

Ziel ist es, Werkzeuge zu entwickeln, die die **Innovationsgeschwindigkeit um den Faktor zwei beschleunigen** und so die schnellere Marktverfügbarkeit neuer Technologien ermöglichen.

Herausforderungen, Lösungsansätze, Alleinstellungsmerkmale

Um das ambitionierte Ziel einer klimaneutralen Luftfahrt zu erreichen, müssen wesentliche luftfahrtspezifische technologische Herausforderungen im Bereich der Digitalisierung gemeistert werden. **Physikalische Phänomene sind derzeit für die weitestgehende Virtualisierung von Entwurf, Entwicklung und Zulassung nicht präzise und schnell genug berechenbar.** Damit sind die Vielzahl aller Phänomene und deren Wechselwirkungen im Rahmen einer multidisziplinären Analyse und Optimierung nicht vorhersagbar und die notwendigen Synergien lassen sich nicht heben. Zudem sind Daten und digitale Modelle nicht durchgängig nutzbar aufgrund verschiedener Datenformate, nicht verbundener Datenspeicher und nicht sichergestellter Datensicherheit. **Es gibt daher keine realistischen Modelle zukünftiger Luftfahrzeuge und Produkte als Basis für die zielgerichtete Entwicklung und Bewertung neuer Technologien.** Ebenso ist es nicht möglich, den zukünftigen Zustand realer Objekte vorauszuberechnen und darauf aufbauend Betriebs- und Wartungsabläufe zu optimieren. **Ferner ist die Integration digitaler Komponenten in physikalische Systeme nicht möglich, weil die Sicherheit der digitalen Systeme nicht nachgewiesen werden kann.** Weiterhin führen diese Gründe auch dazu, dass verschiedene Partner nicht effizient in einem Entwicklungsverbund zusammenwirken können.

Im DLR verfolgte Lösungsansätze für diese Hürden sind:

- Entwicklung und Validierung **hochgenauer numerischer Methoden** für alle relevanten Anwendungsbereiche im

Lufttransportsystem

- Entwicklung und Validierung **multidisziplinärer Analyse- und Optimierungsplattformen** (MDAO) sowie der erforderlichen Optimierungsalgorithmen mit gezielter Adressierung von Hochleistungsrechnerarchitekturen (High Performance Computing, HPC)
- Entwicklung schneller **Analysewerkzeuge sowie Algorithmen zur Problemreduktion** (Reduced-Order Models, ROM) für schnelle gekoppelte MDAO-Studien im Flugzeugentwurf

- Entwicklung und Validierung einer **neutralen Plattform für den standardisierten Daten- und Modellaustausch** mit einheitlichen Datenformaten und sicheren Lösungen für die Handhabung der Daten

- **Entwicklung und Nutzung virtueller Produkte**, die mit großem Detaillierungsgrad alle interdisziplinären Wechselwirkungen zukünftiger Produkte berechenbar machen

- **Entwicklung digitaler Zwillinge**, in denen der kontinuierlich erfasste Ist-Zustand abgebildet wird, als Grundlage für die Berechnung erwartbarer Veränderungen und das Ableiten optimaler Handlungsoptionen

- Erarbeitung von **Zertifizierungskonzepten für autonome Systeme** und Systeme mit künstlicher Intelligenz

- **Erarbeitung digitaler Entwicklungsprozesse** und Optimierung des Zusammenwirkens aller Partner (Model-Based Systems Engineering, MBSE)

Digitale Methoden und künstliche Intelligenz werden Entwurf, Betrieb und Herstellung aller Luftfahrzeuge erheblich befördern. Ziel ist es, die Innovationsgeschwindigkeit um den Faktor zwei zu beschleunigen und so die schnellere Marktverfügbarkeit neuer Technologien zu ermöglichen.

Das DLR betreibt die für die anwendungsnahe Validierung notwendigen Großanlagen und verfügt vereint über Grundlagen- und Anwendungskompetenz. Außerdem verfügt das DLR aufgrund langjähriger Forschung im Bereich der numerischen Simulation über die erforderliche Kompetenz zur Entwicklung und Validierung anwendungsnaher Modelle, um MDAO-Plattform-Technologien zu entwickeln, anzuwenden und auf Hochleistungsrechnern effizient einsetzbar zu machen. Zudem hat das DLR die fachlichen Kompetenzen für Datenformate in der vollen Breite der Luftfahrt, die langfristige Finanzierung und das Vertrauen als neutraler Partner, um die Verantwortung für eine standardisierte Austauschplattform übernehmen zu können. **Nur das DLR verfügt über die Methoden und über die Kompetenz für die Luftfahrt, um hochgenaue und anwendungsnahe Modelle zukünftiger Produkte auszulegen.** Im Sinne der Infrastruktur betreibt das DLR anwendungsnahe Großanlagen, auf denen die Sicherheit von autonomen und KI-basierten Systemen erprobt werden kann, und verfügt über hochgenaue Rechenmethoden, um Zustandserfassung und -vorhersage im Betrieb erproben und validieren zu können. Entscheidend ist dabei, dass nur das DLR mit seinen 55 Forschungsinstituten über alle Kompetenzen verfügt, um im

Rahmen der programmatischen Forschung digitale Entwicklungsprozesse mit vielen eigenständigen Partnern erforschen und anwenden zu können.

Technische Ziele

Hauptziele der DLR-Luftfahrtforschung sind auf diesem Gebiet die **konsequente Entwicklung, Erstellung und Implementierung geeigneter digitaler Methoden, Werkzeuge und Forschungsprozesse zur virtuellen Modellierung, Erprobung, Validierung, Bewertung und Optimierung aller Elemente des Systems Luftfahrt**, um in den nächsten fünf Jahre die Entwicklungsdauer neuer Flugzeuggenerationen zu halbieren und Risiken zu minimieren.

Diese Tätigkeiten werden unterstützt durch den weiteren **Ausbau von Kooperationsräumen** wie dem Virtual Product House des DLR, damit Flugzeugkonfigurationen und deren Komponenten mit allen relevanten Technologien und disziplinären Aspekten analysiert, entworfen und optimiert werden können, um in den nächsten fünf Jahren alle zukunftsweisenden Einzeltechnologien in der nächsten Flugzeuggeneration zu verankern und mit dem deutschen Mittelstand als Technologieentwickler und -lieferant zu verknüpfen.

DIGITALISIERUNG				
HANDLUNGSFELDER				
	2020-2030	2030-2040	2040-2050	
DIGITAL AIRCRAFT Hochgenaue Simulation der Physik, Virtualisierung aller Produkt-Eigenschaften	Alle Flugeigenschaften in der Flugenvolpe vorhersagbar	„Digitaler Erstflug“ und komplette Flugprüfung demonstriert und mit Flugversuch validiert	Das „Digital Aircraft“ ist normaler Bestandteil des Zulassungsprozesses	
DIGITAL TWIN Modellierung funktionaler Zusammenhänge, Virtualisierung der System-Wechselwirkungen	Gesamtflugzeug modelliert, Verknüpfung Real- und Simulationsdaten, Lebenszyklusvorhersage Komponenten	Flugzeug, Produktion & Betrieb sind modelliert, Lebenszyklusvorhersage Flugzeug, Verwendung hochgenerer Verfahren	Lufttransportsystem mit Umwelt & Wirtschaft modelliert, Echtzeitvorhersage Flotte	
DIGITAL THREAD Verfügbarkeit/Aufbereitung notwendiger Daten, Erkenntnisgewinn zur Entscheidungsfindung	DLR Modell-/Datenmanagement, alle Disziplinen, Datenanalyse	Automatisierte Schnittstellen & sicheres Datenmanagement mit externen Partnern	Daten aus gesamter Luftfahrt in Echtzeit & Historie nutzbar	
DIGITAL ENGINEERING Durchgängige Nutzung digitaler Methoden und Werkzeuge in Entwurf und Produktion	MBSE (Model Based Systems Engineering) und HiFi MDO (Multi-Disciplinary Optimization) etabliert	Virtual Testing erfolgt parallel zum Physical Testing (SEN: Synthesis of Experiment and Numerics)	Optimierte, simultane Auslegung für Flugzeug, Betrieb & Produktion; Digitale Zulassung des Luftfahrzeugs	
SYSTEMS ENGINEERING Ganzheitliche digitale Behandlung des gesamten Produkt-Entstehungsprozesses	Digitale Forschungsprozesse für Virtuelle Produkte im DLR etabliert (bei Nutzung von MBSE und MDO)	Sichere Forschungsprozesse mit Externen sind Standard im DLR (Virtual Extended Enterprise)	Optimierung des Forschungsverbundes (Enterprise Architecture Optimization)	
CYBER-PHYSIKALISCHE SYSTEME Hardware	Autonomie-Demonstrator für komplexe Missionen, Roadmap zur Nachweisführung, Betriebskonzepte evaluiert	Erste Zertifizierungsbeispiele komplexer KI-Methoden, erste autonom fliegende Systeme werden erprobt	Zertifizierungsstandards für Autonomie, Verbreitung in der Technologien von KI und Autonomie in der Industrie	

Abbildung 9: Die Handlungsfelder auf dem Gebiet der Digitalisierung liegen auf dem gesamten Spektrum der digitalen Abbildung des Luftverkehrs sowie auf digitalen Entwurfs- und Integrationsmethoden.

4 Die Luftfahrtforschung des DLR



Ein sicherer, umweltverträglicher, effizienter und allen zugänglicher Luftverkehr ist essenziell für das soziale Wohlergehen und die wirtschaftliche Entwicklung Europas und Deutschlands. Insbesondere verfolgt die Europäische Union das Ziel eines emissionsfreien Luftfahrtsystems bis zum Jahr 2050. Die DLR-Luftfahrtforschung arbeitet dazu an drei Säulen eines zukunftssicheren Luftfahrtsystems: **Wettbewerbsfähigkeit der nationalen und europäischen Luftfahrtindustrie stärken, Umweltverträglichkeit und Akzeptanz erhöhen sowie Mobilität gewährleisten.**

Neben substanziellen evolutionären Maßnahmen zur Effizienzsteigerung sind zur Erreichung dieser ambitionierten Ziele revolutionäre Ansätze notwendig, wie elektrisches Fliegen, der Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff sowie die Anwendung künstlicher Intelligenz in der Automatisierung in der Luftfahrt.

Das DLR verfolgt in seiner Luftfahrtforschung einen ganzheitlichen Systemansatz. Das heißt, es erforscht in der Tiefe von den Grundlagen bis zur Anwendung („Multi-Skalen“) die gesamte Breite des Lufttransportsystems („Multidisziplinär“). Dazu gehören die nötige Infrastruktur, neuartige Produktionstechnologien, das öko-effiziente Luftfahrzeug an sich und die Entwicklung seiner Komponenten, ein leistungsfähiges und emissionsreduziertes Lufttransportsystem sowie die Quantifizierung der Auswirkungen auf Klima, Gesellschaft und Wirtschaft. Nur so kann das DLR die nötigen revolutionären Ansätze umfassend abwägen und Entscheidungsträger fundiert beraten. **Die strategische und programmatische Steuerung des DLR ermöglicht dabei eine effiziente und integrierte Behandlung von wissenschaftlich herausragenden Themen über die Grenzen von Instituten hinweg.**

Die durchgängige Digitalisierung, Virtualisierung und Automatisierung der Luftfahrt im gesamten Produktlebenszyklus ist der Schlüssel zu dieser Gesamtsystemfähigkeit. Sie erhöht zudem die Innovationsgeschwindigkeit und damit die schnellere Markverfügbarkeit neuer Technologien durch eine schnellere Entwicklung und auch eine simulationsbasierte Zulassung. Mit der Integration in ein virtuelles Produkt kann das DLR als virtueller Hersteller insbesondere kleine und mittlere Unternehmen beim Markteintritt unterstützen. **Zur Validierung der virtuellen Luftfahrt sind anwendungsnahe Experimente in der Luft und im Labor notwendig. Die Luftfahrtforschung des DLR verfügt über die dafür benötigten**

Infrastrukturen, wie Windkanäle, Großanlagen, Forschungsflugzeuge und durchgängige Simulationseinrichtungen inklusive Hochleistungsrechnern. Für neue, zuverlässige und validierte Systeme müssen physische und virtuelle Entwicklungs- und Erprobungsumgebungen eng aufeinander abgestimmt werden. Insbesondere die interdisziplinäre Zusammenarbeit der **Schwerpunkte Luftfahrt, Raumfahrt sowie Energie und Verkehr** des DLR ist in Europa einzigartig und Voraussetzung für die Gestaltung einer emissionsfreien Luftfahrt der Zukunft. Das DLR ist beispielsweise eine der wenigen Forschungseinrichtungen weltweit, die gleichzeitig Flugzeuge mit nachhaltigen Energieträgern wie Wasserstoff antreiben, deren Emissionen erfassen und die resultierenden Klimaauswirkungen in einem multimodalen Verkehrssystem modellieren können. Diese Fähigkeiten werden mit Unterstützung durch die **Projekträger im DLR** für die Entwicklung und Umsetzung von regionalen, nationalen, europäischen und internationalen politischen Strategien und Maßnahmen eingesetzt. Die spezifische Mischung aus Expertise und Interdisziplinarität der Forschungsthemen, die ganzheitlich-programmatische Ausrichtung in Verbindung mit industrienahen Großanlagen sowie die Kombination „Forschungseinrichtung – Raumfahrtagentur – Projekträger“ ermöglichen die Rolle des DLR als Politikberater und Mitgestalter einer nachhaltigen Luftfahrt der Zukunft.

Fachliche Stärken der Luftfahrtforschung des DLR

Die Luftfahrtforschung im DLR hat sich mit der Entwicklung der Luftfahrtbranche entfaltet. Bis in die 80er-Jahre lag der Fokus auf den technologischen Grundlagen für die Etablierung des Luftverkehrs als Transportmittel. Bereits in den 90ern wurde die Umweltwirkung dieser Technologien, bis hin zum Lärm, identifiziert und untersucht. Im Zuge davon verstärkte sich in den 2000er-Jahren der Fokus auf Nachhaltigkeit. **Durch diese langjährige Begleitung der Luftfahrt hat die DLR-Luftfahrtforschung spezifische wissenschaftlich-technische Stärken entwickelt, die nun notwendige Voraussetzung sind, um die Ziele der nachhaltigen Luftfahrt zu realisieren.**

Numerische Simulation

Im DLR-Projekt VicToria (Virtual Aircraft Technology Integration Platform) wurden die Grundlagen für die vollständige digitale Entwicklung und Beschreibung von Flugzeugen und Helikoptern gelegt. Das Projekt hat einen wesentlichen

Die DLR-Luftfahrtforschung arbeitet an den drei Säulen eines zukunfts-sicheren Luftfahrtsystems: Wettbewerbsfähigkeit der nationalen und europäischen Luftfahrtindustrie stärken, Umweltverträglichkeit und Akzeptanz erhöhen sowie Mobilität gewährleisten.



Beitrag im Hinblick auf verbesserte physikalische Modellierung, verbesserte numerische und experimentelle Methoden, Verifikation und Validierung mit dedizierten Flug- und Windkanaltests sowie hochgenaue multidisziplinäre Simulation und Optimierung von Flugzeugen und Hubschraubern auf Hochleistungsrechnern geleistet. **Mithilfe dieser vollständig digitalen Beschreibung der Produkteigenschaften von Hubschraubern und Flugzeugen wird es zukünftig möglich sein, einen „digitalen Zwilling“ des Flugzeugs oder Hubschraubers bereitzustellen**, der dazu genutzt werden kann, das Potenzial neuartiger Technologien in einer virtuellen Entwurfsumgebung im Sinne von Trade-offs zu bewerten und nutzen zu können und Technologiefolgen, wie den Einfluss auf die Umwelt, abschätzen zu können.

Technologieentwicklung

Im Projekt Optimal Lastadaptives Flugzeug (oLAF) geht das DLR der Frage nach, welches Effizienzsteigerungspotenzial der Einsatz von Technologien zur aktiven Lastabminderung im Entwurf zukünftiger Flugzeuge bietet. **Vorteile des umfassenden Einsatzes von Lastabminderungstechnologien sind leichtere Flugzeugstrukturen, verringerter Treibstoffverbrauch, reduzierte Betriebskosten und geringere Emissionen.** Mit dieser Zielsetzung entwer-

fen und optimieren die Projektpartner in oLAF ein lastoptimales Langstreckenflugzeug unter Anwendung vorwiegend hochgenauer gekoppelter numerischer Verfahren für Aerodynamik, Struktur, Aeroelastik, Lasten, Flugregelung und Systeme. Unter Einbindung der im Projekt neu entwickelten Lastabminderungskonzepte bewerten sie dabei die Auswirkungen von aggressiver Lastkontrolle auf flugphysikalische Leistung, Betrieb, Instandhaltung und Energieverbrauch.

Luftfahrtantriebe

Im Rahmen des DLR-Projekts PERFECT (Preliminary design and evaluation of future engine concepts) wird eine **Konzeptions- und Vorauslegungsmethodik für Flugantriebe entwickelt, die es gestattet, neuartige Antriebe in einem Vorentwurfsstadium zu konzipieren, die Komponenten aufeinander abzustimmen und die Gesamtpformance zu optimieren.** In einem weiteren Schritt soll die erarbeitete Systematik auf innovative Antriebe für Regional-, Mittel- und Langstreckenflugzeuge angewendet werden. Unter Einbeziehung des neu gegründeten Instituts für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe in Cottbus soll die Systematik auf elektrische Komponenten erweitert und in dafür neu zu errichtenden Komponentenprüfständen experimentell validiert werden.

Durch die langjährige Begleitung der Luftfahrt hat die DLR-Luftfahrtforschung spezifische wissenschaftlich-technische Stärken entwickelt, die für die nachhaltige Luftfahrt eingesetzt und ausgebaut werden.

Flugzeugentwurf und Technologiebewertung

Im DLR-Projekt EXACT (Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies) beschäftigen sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der Entwicklung neuer Technologiebausteine für ein ökoeffizientes Verkehrsflugzeug. **Übergeordnetes Ziel ist es, bis zum Jahr 2040 die erforderlichen Technologien für ein solches Luftfahrzeug mit mindestens 70 Sitzen und einer**

Reichweite von 2.000 Kilometern zur Einsatzreife zu bringen. Hierfür sollen im ersten Schritt unterschiedliche hybrid-elektrische Antriebskonzepte und mögliche Flugzeugkonfigurationen untersucht werden. Außerdem werden Wechselwirkungen mit der Flughafeninfrastruktur betrachtet und wie sich neuartige Antriebe auf die Atmosphäre und somit auf das Klima auswirken.



Die DLR-Luftfahrtforschung ist national, europäisch wie auch weltweit hervorragend vernetzt und arbeitet in vielfältigen Beziehungen und Kooperationen partnerschaftlich daran, das Lufttransportsystem der Zukunft mitzugestalten.

Großskalige Erprobung im Flug

Ein modularer Demonstrator ermöglicht es, verschiedene Antriebskonzepte zu testen. **Mit der Dornier Do 228 stellt das DLR der deutschen Industrie- und Forschungslandschaft eine solche einzigartige Erprobungsmöglichkeit für hybrid-elektrische Architekturen zur Verfügung.**

Im Projekt Do228hep untersucht das DLR gemeinsam mit dem Triebwerkshersteller MTU die Entwicklung, Realisierung und Flugdemonstration eines elektrischen oder hybrid-elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle auf dem Erprobungsträger. Um diese Kompetenzen weiter aufzubauen, hat das DLR das Institut für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe in Cottbus gegründet. Es konzentriert sich mit seiner Forschung auf emissionsärmere, in der Regel stärker elektrifizierte zukünftige Luftfahrtantriebe für zivile Transportflugzeuge.

Nachhaltige Luftfahrt-Brennstoffe

Im Projekt ECLIF II (Emissions and CLimate Impact of alternative Fuels) wies das DLR 2018 nach, dass der Einsatz von regenerativ erzeugtem Kerosin heute bereits die CO₂-Emissionen um 40 % und die Ruß-Emissionen um bis zu 70 % reduzieren kann. **Mit ECLIF III realisiert das DLR 2021 gemeinsam mit Airbus, Rolls-Royce und Nests die weltweit erste Studie zur Untersuchung von Emissionen eines mit zu 100 % SAF betriebenen kommerziellen Passagierflugzeugs – einer Airbus A350XWB-900.**

Klimaaoptimierte Flugrouten

Individualisierte Flugrouten können dabei helfen, den menschengemachten globalen Temperaturanstieg zu begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Luftverkehrsmanagement deutlich stärker automatisiert werden, als das heute der Fall ist. Das DLR-Projekt DIAL (Der individuelle und automatisierte Luftverkehr) bündelt Forschungsarbeiten, um die Automatisierung der Flugführung auszubauen.

So können Flugplaner für jedes Flugzeug am Himmel maßgeschneiderte klimaaoptimierte Routen anbieten, die etwa Gebiete in der Atmosphäre mit langlebiger Kondensstreifenbildung umgehen. Die DLR-Forscherinnen und -Forscher entwickeln im Projekt DIAL Verfahren, die eine gleichzeitige Optimierung nach mehreren klimarelevanten Faktoren und eine erhöhte Kapazität des Luftverkehrsmanagements ermöglichen. Gleichzeitig soll das Luftverkehrsmanagement mit zunehmender Automatisierung produktiver werden. Das macht die Verkehrsführung am Himmel zusätzlich robuster und flexibler, wenn die Nachfrage wieder steigt.

Klimawirkung

Die COVID-19-Pandemie hat eine einmalige Chance mit sich gebracht, die Wirkung der Luftverschmutzung zu untersuchen. Die verringerten Emissionen aus Industrie und Verkehr ermöglichen die Abschätzung der Auswirkung solcher Emissionen auf die Atmosphärenchemie und -physik. Diese

Besonderheit hat ein deutsches Forscherteam kurzfristig für die Flugkampagne BLUESKY genutzt, bei der die Veränderungen in der Erdatmosphäre weltweit mit zwei Forschungsflugzeugen untersucht wurden. **So wurde die Atmosphäre in einem Zustand vermessen, der in Zukunft durch nachhaltiges Wirtschaften und nachhaltige Luftfahrt erreicht werden könnte.**

Politikberatung

Durch sein umfassendes Know-how berät das DLR unter anderem die Bundesregierung bei der Ausrichtung ihrer Technologiestrategie für eine umweltverträgliche Luftfahrt und unterstützt nationale Gremien bei ihren Entscheidungen zur Technologieauswahl und Technologieförderung. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie setzt das DLR in Zusammenarbeit mit weiteren Bundesministerien das nationale Luftfahrtforschungsprogramm um und unterstützt nationale Aufsichtsbehörden wie das Luftfahrt-Bundesamt (LBA) bei Fragen der Entwicklung von Standards. Das DLR bringt seine Expertise ebenfalls auf europäischer Ebene in der Zusammenarbeit mit der European Union Aviation Safety Agency (EASA) und weltweit mit Beiträgen zu den Arbeiten der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization, ICAO) ein.

Kooperationen und Partner

Die Transformation der Luftfahrt hin zu einem globalen klimaneutralen Luftverkehr der Zukunft ist keine nationale Aufgabe: **Globale Herausforderungen erfordern globale Lösungen.** Erst durch eine engmaschige internationale Zusammenarbeit und den Wissensaustausch zwischen Forschungseinrichtungen, Hochschulen, Industrie, Politik und Behörden in Bezug auf Technologieentwicklungen, Standardisierungen sowie Zertifizierungen können Fluggeräte entwickelt werden, die in einem internationalen Markt den ökologischen Anforderungen gerecht werden und anwendbar sind. Diese Zusammenarbeit ermöglicht nicht nur die Förderung des Wissenstransfers zwischen allen Akteuren, sondern auch eine optimale Nutzung von Ressourcen und Infrastrukturen und einen zielgerichteten Technologietransfer aus der Forschung in kommerzielle Produkte.

Die DLR-Luftfahrtforschung ist national, europäisch wie auch weltweit hervorragend vernetzt und arbeitet in vielfältigen Beziehungen und Kooperationen partnerschaftlich daran, das Lufttransportsystem der Zukunft mitzugestalten. Bei

vielen Themen der Luftfahrtforschung nimmt es national und international eine führende Rolle ein.

Seit 2016 arbeitet das DLR als Mitglied im Forschungsprogramm SESAR 2020 mit allen relevanten europäischen Interessengruppen wie den Flugsicherungsdiensten, Flughäfen, Fluggesellschaften, Flugzeugherstellern und Herstellern von Flugsicherungsgeräten an anwendungsorientierten Maßnahmen für einen sicheren, emissionsarmen, kosteneffizienten und einheitlichen Flugverkehr in Europa.

Die intensive und vielfältige Zusammenarbeit des DLR mit der Luftfahrtindustrie und der Luftverkehrswirtschaft schlägt sich in zahlreichen Forschungsaufträgen nieder. **Dank seines interdisziplinären Forschungsspektrums kann das DLR die deutsche Luftfahrtindustrie optimal unterstützen, ihren Wettbewerbsvorteil am Weltmarkt zu festigen und weiter auszubauen.** Nach der Corona-Krise hilft das DLR der deutschen und europäischen Luftfahrtindustrie dabei, den veränderten Herausforderungen zu begegnen und neue Forschungsaufgaben in der Praxis zu adressieren. Dabei unterstützt es nicht nur große Flugzeughersteller, sondern fördert darüber hinaus das Wachstumspotenzial kleiner und mittelständischer Unternehmen sowie Start-ups. Auch mit anderen Forschungsorganisationen arbeitet das DLR eng zusammen. In Projekten wie BLUESKY kommt das DLR beispielsweise mit der Max-Planck-Gesellschaft, Universitäten und weiteren Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft zusammen, um grundlegende Forschungserkenntnisse zu den Klimaauswirkungen der Luftfahrt zu gewinnen.

Die Kooperation innerhalb Europas nimmt für das DLR einen besonders wichtigen Stellenwert ein, da die Mitgliedsstaaten spezifische Fähigkeiten haben sowie komplementäre Versuchsanlagen betreiben, die in internationalen Forschungsprojekten zu einem noch umfassenderen Verständnis der Luftfahrt beitragen.

So agiert das DLR beispielsweise seit 1994 als Gründungsmitglied der Association of European Research Establishments in Aeronautics (EREA), des Zusammenschlusses europäischer Luftfahrtforschungseinrichtungen. Die dort vertretenen Forschungseinrichtungen setzen sich einerseits für die interne Kooperation und Abstimmung ein und vertreten andererseits ihre Interessen gemeinsam gegenüber europäischen Institutionen und Partnern. **Das DLR ist nicht nur Mitgründer von EREA, sondern auch ein wichtiges Mitglied, das seine Technologien und Forschungsansätze in gemeinsame europäische Forschungsprojekte**





unter dem Dach von EREA einbringt und EREA-Positionspapiere zu europäischen Forschungs- und Innovationsstrategien mitgestaltet. Mit EREA Future Sky, einer Joint-Research-Initiative, hat das DLR über die EREA die Möglichkeit, Ausschreibungen im europäischen Rahmenprogramm für Forschung und Innovation mitzugestalten und so die Luftfahrtforschungsagenda der Europäischen Union indirekt zu beeinflussen.

Eine weitere direkte Gestaltungsmöglichkeit nimmt das DLR bei der Entwicklung strategischer Konzepte für die Luftfahrt von morgen im Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE) wahr. ACARE hat die Aufgabe, die strategische Forschungs- und Innovationsagenda für die Luftfahrt zu erstellen beziehungsweise weiterzuentwickeln und deren Umsetzung zu unterstützen. ACARE trägt so dazu bei, nationale und europäische Prioritäten aufeinander abzustimmen, um möglichst effektive und ganzheitliche Lösungen zu entwickeln. Dabei ist ACARE ein wichtiges Beratungsgremium für unter anderem öffentliche Stellen wie Mitgliedsstaaten und die Europäische Kommission. Beispielshaft ist hierbei Clean Sky als Public-private-Partnership innerhalb des EU-Rahmenprogramms zu nennen, in dem neue Technologien wie die laminare Umströmung von Flügeln in den Flugversuch an Verkehrsflugzeugen gebracht werden.

Auch international nimmt das DLR in der weltweiten Vereinigung der Luftfahrtforschungseinrichtungen (International Forum for Aviation Research, IFAR) eine herausragende Rolle ein. IFAR ist das einzige weltweite Netzwerk, das staatliche Luftfahrtforschungseinrichtungen aller Kontinente vereint. Es zielt darauf ab, den globalen Herausforderungen der Luftfahrt Lösungen durch die kooperative Luftfahrtforschung entgegenzusetzen, die Zusammenarbeit und den Informationsaustausch zu fördern und den wissenschaftlichen Nachwuchs in der Luftfahrt voranzubringen. Dieses Umfeld ermöglicht auch eine internationale Harmonisierung in Bezug auf Regulation und Gesetze sowie den Betrieb. In diesem Kontext berät IFAR beispielsweise die ICAO. Außerdem können im IFAR-Verbund große Versuchsanlagen wie Demonstratoren quervalidiert werden, mit europäischen EREA-Partnern wie der ONERA und dem NLR und internationalen Partnern wie der NASA, der JAXA und dem NRC. **Das DLR ist Gründer, Impulsgeber und Koordinator verschiedener IFAR-Aktivitäten. 2020 wurde beispielsweise auf Initiative des DLR das Zero Emission Aviation Statement weltweit veröffentlicht. In diesem Statement erklären Forschungseinrichtungen aus 13 IFAR-Mitgliedsorganisationen umweltfreundliches Fliegen zum gemeinsamen Ziel.**

Fazit

Die Luftfahrt wird sich in den kommenden Jahrzehnten als klimaneutraler Motor der Wirtschaft und des interkulturellen Austauschs neu erfinden. In Europa ist dieses Ziel nachdrücklich durch den European Green Deal gesetzt. Das Wachstum des Luftverkehrs darf zukünftig nicht mehr zu steigenden Emissionen führen. Es muss vom Wachstum des Luftverkehrs und den damit steigenden CO₂-Emissionen entkoppelt werden.

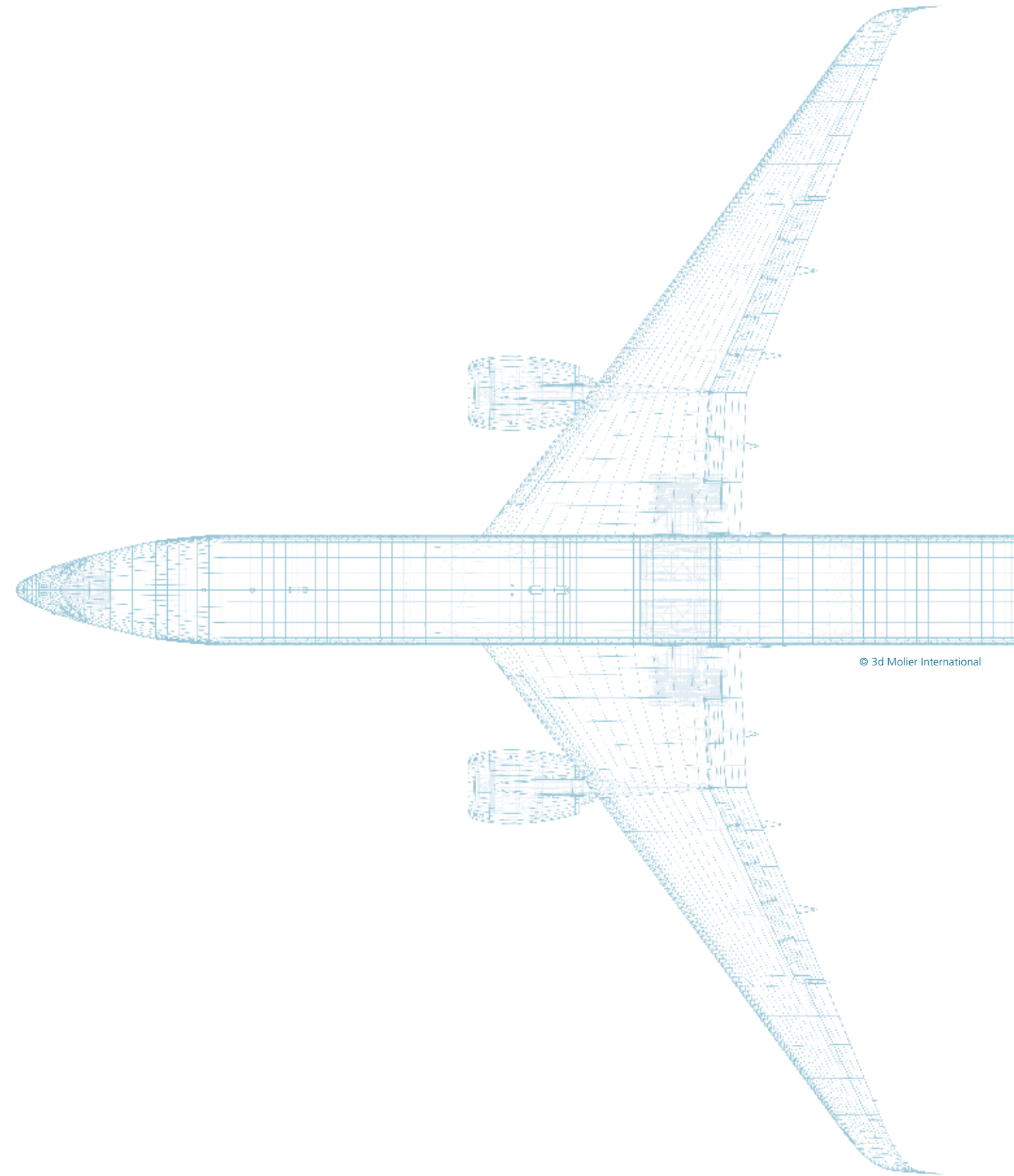
Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat sich die Vision einer emissionsfreien Luftfahrt gesetzt. Dabei verfolgt die DLR-Luftfahrtforschung einen ganzheitlichen Ansatz, um umfassende Lösungen zu entwickeln. Mit dieser Kompetenz für das Gesamtsystem Luftfahrt füllt das DLR die Rolle eines virtuellen Herstellers (Virtual OEM) und bindet dabei andere Akteure der Luftfahrtforschung, der Luftverkehrsindustrie und -wirtschaft ein.

Die technischen Potentiale zeigen: **Der Weg hin zu einer klimaneutralen Luftfahrt ist bis zur Mitte des Jahrhunderts möglich. Diese Transformation muss vielfältig und technologieoffen gestaltet werden.** Evolutionäre Schritte sind ebenso nötig wie der konsequente Einsatz verfügbarer revolutionärer Technologien. Vier wesentliche Themengebiete sind zu nennen: der emissionsarme Luftfahrtantrieb, das energieeffiziente Flugzeug, das emissionsreduzierte Lufttransportsystem und die Digitalisierung. **Nur durch die Verknüpfung dieser Themengebiete lässt sich das dargestellte Ziel der klimaneutralen Luftfahrt bis 2050 erreichen.**

Im Fokus der hier vorgestellten Strategie steht die Einführung von nachhaltigen Luftfahrt-Brennstoffen, insbesondere von **regenerativ erzeugtem Kerosin für alle Flugzeugklassen**. Dieses kann die klimarelevanten Emissionen bereits kurzfristig um **80 Prozent** senken. Zudem ist die Entwicklung **energieeffizienter Technologien** für Antrieb, Flugzeug und Lufttransportsystem nötig, die **auf allen Strecken** bis 2050 zusätzlich **mehr als die Hälfte der verbleibenden Emissionen** einsparen können. Für eine weitere Senkung der Emissionen sind alternative Antriebsarten voranzubringen, insbesondere **Wasserstoffverbrennung für die Kurz- bis Mittelstrecke** und **brennstoffzellen-elektrische Antriebe auf der Regionalstrecke**. Die **Digitalisierung** ist dabei ein entscheidendes Werkzeug für alle zukünftigen Entwicklungen. Sie soll es bis 2050 ermöglichen, neue **Lösungsansätze kosteneffizienter und doppelt so schnell** zu finden wie heute und so die Transformation zur Klimaneutralität zu beschleunigen.

Das DLR ist hervorragend aufgestellt, um die Transformation hin zur emissionsfreien Luftfahrt wissenschaftlich und technologisch zu gestalten. Nur das DLR verfügt mit seinen 55 Instituten über alle Kompetenzen, um im Rahmen der programmatischen Forschung digitale Entwicklungsprozesse mit vielen eigenständigen Partnern voranzutreiben. **Die Mischung aus Expertise und Interdisziplinarität, die ganzheitlich-programmatische Ausrichtung in Verbindung mit industrienahen Großanlagen sowie die Kombination „Forschungseinrichtung – Raumfahrtagentur – Projektträger“** gewähren die Rolle des DLRs als **Architekt, Integrator, Politikberater und Mitgestalter einer nachhaltigen prosperierenden Luftfahrt der Zukunft**.

Die Forschung des DLR bereitet den Weg in die klimaneutrale Zukunft der Luftfahrt. Das ist unser Beitrag zum European Green Deal.



© 3d Molier International

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Wir betreiben Forschung und Entwicklung in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger betreuen Förderprogramme und unterstützen den Wissenstransfer.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 55 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 10.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft. So tragen wir dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

Impressum

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Programmstrategie Luftfahrt

Anschrift:

Linder Höhe, 51147 Köln
E-Mail: info-dlr@dlr.de

DLR.de

Bilder: DLR (CC BY-NC-ND 3.0), soweit nicht anders angegeben.

Titelbild: DLR/L. Winkler



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages