

# Die Flugzeuge von morgen

## Energieeffizientes und nachhaltiges Fliegen

NACHHALTIGE +  
EFFIZIENTE



LUFTFAHRT

Die zivile Luftfahrt ist verantwortlich für etwa 3,5 Prozent der klimaschädlichen Emissionen. Der resultierende Klimawandel ist ein globales Problem. Wie sieht also das nachhaltige Flugzeug von morgen aus? In der Luftfahrtforschung zeichnet sich derzeit folgendes Bild ab: Während auf Kurzstreckenflügen bereits in naher Zukunft vollkommen elektrisch angetriebene Flugzeuge zum Einsatz kommen könnten, eignen sich diese nach aktuellem Stand der Forschung nicht für höhere Reichweiten. Ein Grund hierfür ist, dass Batterien bei fortschreitender Entladung nicht leichter werden. Im Gegensatz dazu erleichtert der Verbrauch von Treibstoff das Flugzeug kontinuierlich, wodurch sich Langstreckenflüge erst realisieren lassen. Hier sind Alternativen gefragt.

Daran, wie diese Alternativen aussehen können, forschen Wissenschaftler\*innen der Leibniz Universität Hannover im Exzellenz-Cluster 2163 „Sustainable and Energy Efficient Aviation“ (Nachhaltige und energieeffiziente Luftfahrt, kurz SE<sup>2</sup>A), das von unseren Partnern an der Technischen Universität Braunschweig koordiniert wird.

### Nachhaltige und energieeffiziente Luftfahrt

In der deutschen Forschungslandschaft sind Exzellenz-

Cluster eine große Sache: Kaum andere Förderprogramme ermöglichen eine derart breite und transdisziplinäre Erforschung ähnlich umfassender Fragestellungen, wie der nach dem nachhaltigen Luftfahrtsystem von morgen. Dies ist allerdings auch notwendig, da die oben gezeigte Breite an Anwendungsszenarien – und an möglichen Lösungen – Forschung in verschiedensten Bereichen der Ingenieur- und Gesellschaftswissenschaften erfordert. Die verfolgten Lösungsansätze beschränken sich hierbei nicht nur auf den Antrieb der Flugzeuge, sondern umfassen auch den Flugzeugentwurf und infrastrukturelle Überlegungen.

Elektrische Antriebskomponenten, Antriebssysteme für das Fliegen mit Wasserstoff oder eFuels, das Bordnetz des Flugzeugs sowie die Frage, wie sich all dies in ein mögliches leichtes Flugzeug integrieren lässt, nehmen eine ebenso zentrale Rolle ein wie ökonomische Fragen.

### Fliegen mit Wasserstoff

Größere Reichweiten erfordern Energieträger mit hohem Energieinhalt wie beispielsweise nachhaltig erzeugtem Wasserstoff. Aktuell werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt: die Nutzung in Brennstoffzellen und die direkte Verbrennung des Wasserstoffs. Was-

serstoff könnte über Brennstoffzellen in elektrischen Strom gewandelt werden, um damit eine elektrische Antriebstechnologie zu versorgen. Brennstoffzellen in den hierfür benötigten hohen Leistungsklassen stellen eine technologische Herausforderung dar, weil für den Einsatz im Flugzeug höhere Leistungsdichten unabdingbar sind und auch Fragen bezüglich der Kühlung oder der Integration mit dem Verdichter noch beantwortet werden müssen. Hieran wird – unter anderem auch in SE<sup>2</sup>A – geforscht. Einen weiteren Ansatz stellt die direkte Verbrennung von Wasserstoff dar. Hier könnten modifizierte Triebwerke in ähnlicher Systemanordnung wie bisher genutzt werden. Aktuelle Forschungsthemen im Bereich der Wasserstoffverbrennung sind beispielsweise die Flammenstabilisierung und die Reduktion der zu hohen Flammentemperaturen. Diese werden künftig von 23 Partnern im EU-HESTIA Konsortium untersucht, inklusive dem Institut für Technische Verbrennung (ITV).

Herausfordernd bleibt auch die Wasserstoff-Speichertechnologie, wobei die kryogene (tief-kalte) Speicherung in flüssiger Form favorisiert wird. Allerdings würden somit etwa ein Drittel der Passagierplätze für die Wasserstofftanks verloren gehen, was wirtschaftlich problematisch ist. Eine Alternative wären

Flugzeugentwürfe mit mehr Fassungsvermögen.

Flüssige Energieträger haben aufgrund der höheren Energiespeicherdichte hier Vorteile gegenüber Wasserstoff. Nah an der Anwendungsbereitschaft ist auf nachhaltige Weise synthetisch erzeugtes Kerosin (*Sustainable Aviation Fuel*, SAF; auch als eFuel bezeichnet). Dessen Vorteile liegen auf der Hand: Bestehende Flugzeuge können unverändert weiter genutzt werden und SAF ist CO<sub>2</sub>-neutral. Allerdings entstehen bei der Verbrennung von SAF weiterhin Schadstoff-Emissionen, wie Rußpartikel und Stickoxide, die etwa doppelt so schädlich sind wie das CO<sub>2</sub>. Deshalb wird in SE<sup>2</sup>A auch daran geforscht, wie man bessere synthetische Energieträger finden kann, die ein ultrasauberer Brennverfahren (*Lean Premixed Prevaporized Combustion*) erlauben. Erste Forschungsergebnisse des ITV und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig sind vielversprechend, um die Vision der CO<sub>2</sub>-Neutralität und der Schadstoff-Freiheit zu verwirklichen.

Eine Verfügbarkeit von Wasserstoffantrieben für Kurz- und Mittelstreckenflüge wird für frühestens 2030 prognostiziert. Für Langstreckenflugzeuge gilt der Einsatz von nachhaltig erzeugten synthetischen flüssigen Kraftstoffen (eFuels) als wahrscheinlich.

Neben technologischen Herausforderungen geht der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger mit umfassenden volkswirtschaftlichen Implikationen einher, denn Wasserstoff muss produziert, gelagert, verflüssigt und transportiert werden, was wiederum mit Kosten, aber auch mit Aspekten wie Beschäftigungseffekten zusammenhängt. Diese Auswirkungen werden

am Institut für Umweltökonomik und Welthandel (IUW) untersucht. Auch auf der Verbraucherseite kann es zu makroökonomischen Anpassungen kommen: Der Flugsektor ist an eine Vielzahl von Industrien und Sektoren gekoppelt, die ein Wechsel zur wasserstoffbetriebenen Luftfahrt ebenfalls stark beeinflusst.

### Elektrisches Fliegen und Bordelektronik

Im Fokus des Instituts für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) stehen die Untersuchung des elektrischen Antriebsstrangs sowie des Bordnetzes für den Einsatz in zukünftigen elektrisch angetriebenen Flugzeugen. Es werden sowohl Systemaspekte, wie beispielsweise verschiedene Schaltungskonzepte, Wärmeabfuhr, Redundanz und Zuverlässigkeit, als auch Grundlagenforschung im Bereich der sogenannten Leistungshalbleiter und Methoden zur anforderungsgerechten Dimensionierung von elektrischen Maschinen entwickelt. Dabei spielt insbesondere eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig hohen Wirkungsgraden und die optimale Integration der unterschiedlichen Komponenten eine entscheidende Rolle.

### Bordnetz und Antriebe

Hauptverbraucher in elektrisch angetriebenen Flugzeugen sind die Propulsoren. Propulsoren ersetzen beziehungsweise ergänzen herkömmliche Antriebe, die elektrische Energie wird hierbei in Batterien oder Brennstoffzellen gespeichert, ein Elektromotor treibt einen Propeller oder einen Fan an. Zu deren Versorgung werden sowohl ein zentrales als auch ein dezentrales Energieversorgungssystem in enger Abstimmung mit dem Institut

für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB) der TU Braunschweig, untersucht. Beide Ansätze müssen hinsichtlich ihrer Eignung geprüft werden. Dabei spielen neben Gewicht und Bauraum auch die Zuverlässigkeit eine entscheidende Rolle.

Für das Bordnetz in einem zentralen System ist ein Gleichspannungsnetz besonders geeignet, da hierdurch Blindleistungsverluste vermieden werden und zusätzliches Gewicht durch den Wegfall von den ansonsten nötigen Gleichrichtern eingespart werden kann.

Bei der Dimensionierung elektrischer Systeme in Flugzeugen sind immer auch die besonderen Umweltbedingungen zu beachten. In der typischen Reisehöhe für Kurzstreckenflugzeuge von sechs Kilometern sinkt infolge des reduzierten Luftdrucks die Durchschlagfeldstärke der Luft um über 40 Prozent. Zusätzlich ist der Einfluss von Höhenstrahlung und tiefer Temperaturen auf Halbleiter zu beachten. Beispielsweise löst die Höhenstrahlung sogenannte „*Single Event Effects*“ (SEE) aus, wodurch die Halbleiterelemente bei falscher Auslegung zerstört werden. Bei der genannten Flughöhe ergibt sich eine etwa 70-fache Belastung, verglichen mit Anwendungen auf der Erdoberfläche. Aus diesem Grund werden vom IAL Untersuchungen zur Robustheit von Halbleitern gegen Höhenstrahlung durchgeführt.

Vielversprechende Technologien für elektrische Maschinen sind Direktantriebs-Konzepte, der Einsatz additiver Fertigungsverfahren („3D-Druck“), fortschrittliche Kühlkonzepte und ein Integrationsansatz sowohl von Maschine, Leistungselektronik und Kühlung als auch des Propellers. Es ist ein Kompro-

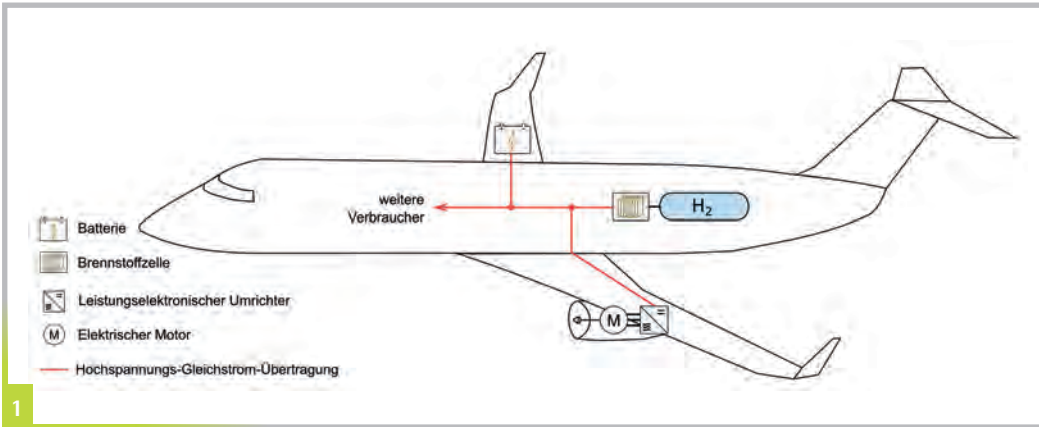


Abbildung 1  
Schematische Struktur eines Bordnetzes mit Batteriespeicher und Brennstoffzelle  
Quelle: eigene Darstellung

miss zwischen hoher Leistungsdichte und einem guten Wirkungsgrad unter dem Aspekt der vielfältigen Dimensionierungsmöglichkeiten elektrischer Maschinen zu finden.

**Systemoptimierung**

Die Erkenntnisse der Untersuchungen werden kontinuierlich mit dem Projektpartner am Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichersysteme am Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) zur Optimierung der gesamten Energieversorgung ausgetauscht. Um die erarbeiteten Konzepte für das Energieversorgungssystem messtechnisch zu validieren, werden am IMAB und

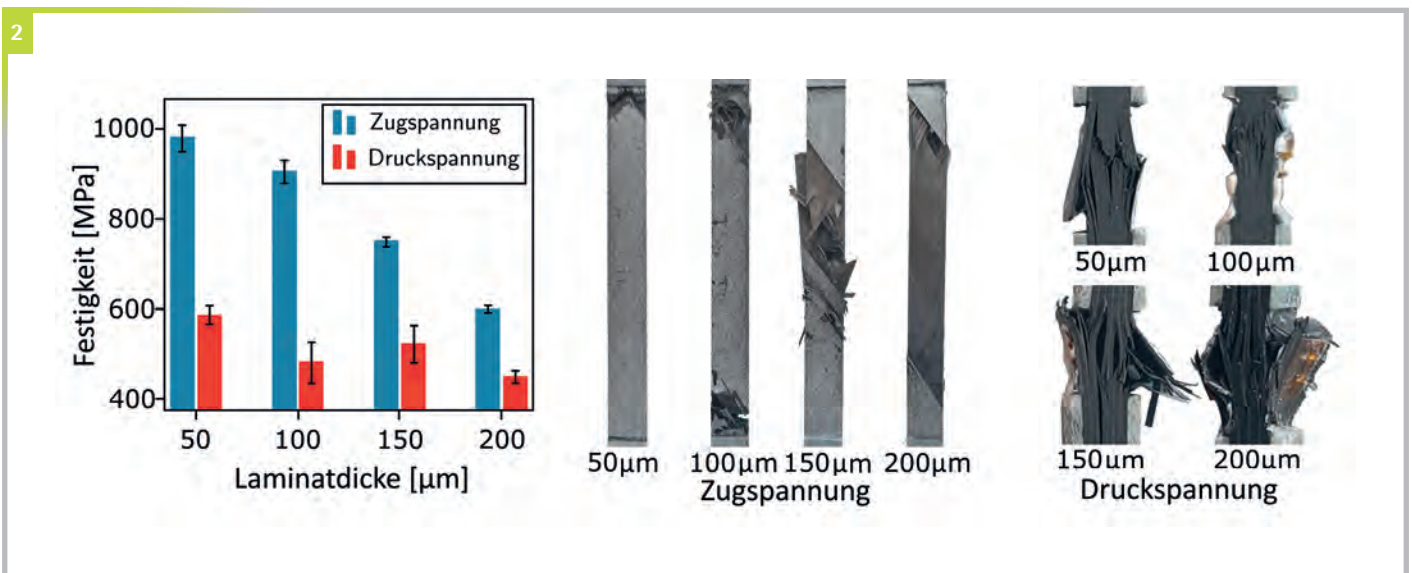
am IAL parallel Laborumgebungen aufgebaut, die jeweils die zentrale und die dezentrale Struktur nachbilden sollen. Ziel ist unter anderem der gemeinsame Betrieb der Komponenten gemäß typischen Flugprofilen, Überlastmanövern und Fehlerszenarien sowie die Untersuchung der elektromagnetischen Verträglichkeit. Von besonderer Bedeutung ist hierbei neben der effizienten Umwandlung der gespeicherten Energie in Batterien besonders die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger, der zu weiteren Anforderungen am elektrischen System führen wird. *Abbildung 1* stellt stark vereinfacht die Struktur eines Bordnetzes inklusive Batteriespeicher und einer Brennstoffzelle dar.

**Leichtbau, Aerodynamik und Verdichter**

Zusätzlich zur Frage, ob zum Fliegen elektrisch gespeicherte Energie, Wasserstoff oder SAF eingesetzt werden, ist die Energieeffizienz des Gesamtsystems Flugzeug stets von zentraler Bedeutung. Hinsichtlich Energieeffizienz und Leistungsdichte müssen auch in den Bereichen Leichtbau, Aerodynamik und Antriebskomponenten Fortschritte erbracht werden, um den Anforderungen für eine nachhaltige Luftfahrt gerecht zu werden.

An den beiden „Stellschrauben“ Leichtbau und Aerodynamik wird im Rahmen von SE<sup>2</sup>A durch den Entwurf und die Integration eines „Suction Panels“ in den Tragflügel gedreht. Durch eine aktive Grenzschichtabsaugung wird die laminare Laufstrecke verlängert und damit der aerodynamische Widerstand stark gesenkt. Hierzu wird an der kritischen Stelle eine additiv gefertigte Polymerstruktur mit mikroperforierter Oberfläche in den Flügel eingebettet, durch die dann die Grenzschicht abgesaugt werden kann. Dadurch erhöht sich jedoch das Baugewicht, was wiederum durch eine effi-

Abbildung 2  
Thin-Ply Laminate: Festigkeitssteigerung und Bruchbilder in Abhängigkeit der Lagendicke bei gleicher Materialstärke  
Quelle: eigene Darstellung



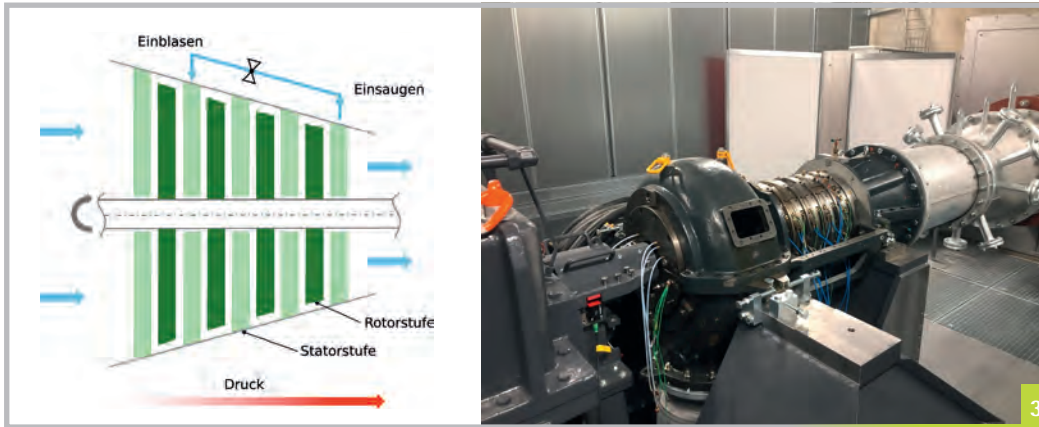


Abbildung 3  
Links: schematische Darstellung von aktiver Strömungsbeeinflussung im Verdichter durch kontrolliertes Ein- und Ausblasen von Luft. Rechts: Vierstufiger Axialverdichter im Forschungsbau  
Dynamik der Energiewandlung  
Quelle: eigene Darstellung

zientere Tragstruktur des Flügels kompensiert werden muss. Das Institut für Statik und Dynamik (ISD) forscht in diesem Zusammenhang an dem statischen und dynamischen Verhalten sogenannter „Thin-Ply“ Laminaten. Dies sind Kohlefaserverbundlaminaten mit besonders dünnen Einzelschichten. Sie weisen gegenüber konventionellen Laminaten überlegene mechanische Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Ermüdung auf (Abbildung 2). Hierfür werden vom ISD neue Strukturanalysemethoden entwickelt, die bei dem Design von ultraleichten Tragstrukturen helfen.

Turboverdichter, die mit Hilfe rotierender Schaufeln Luft verdichten, spielen eine zentrale Rolle in den Bemühungen um eine nachhaltigere Luftfahrt, denn sowohl Brennstoffzelle als auch Wasserstoffverbrennung benötigen einen effizienten und flexiblen Verdichter zur Bereitstellung von komprimierter Luft als Arbeitsmedium. Daher forscht das Institut für Turbomaschinen und Fluidodynamik (TFD) im Rahmen von SE<sup>2</sup>A an neuen, innovativen Verdichterkonzepten.

So sollen beispielsweise durch den Einsatz von aktiver Strömungsbeeinflussung dessen Effizienz und Leistungsdichte über einen breiten Betriebsbereich gesteigert werden. Hier-

bei wird energiereiche Luft aus dem hinteren Teil des Verdichters abgesaugt und in den vorderen Stufen wieder eingeblasen, um dort der Strömung zusätzlichen Impuls zu verleihen. Dadurch löst sich die Strömung nicht mehr von den Schaufeln ab und ihr verlustbehafteter Nachlauf wird reduziert. Saugt man die Luft dabei aus Bereichen ab, in denen ohnehin größere Druckverluste auftreten, beispielsweise im Spalt zwischen Schaufel und Gehäuse oder im Bereich effizienzschädlicher Strömungsablösungen, profitiert man gleich doppelt (Abbildung 3).

Mit Hilfe formvariabler Schaufeln, die zusammen mit Wissenschaftler\*innen vom DLR und der Technischen Universität in Braunschweig erforscht werden, soll zusätzlich die Flexibilität des Verdichters verbessert werden. Durch kleine elektrische Aktuatoren können diese Verdichterschaufeln so verformt werden, dass sie in den wichtigen Betriebsbereichen ideal angeströmt werden. Dadurch arbeitet der Verdichter auch außerhalb des eigentlichen Auslegungspunktes, also beispielsweise während des Take-Offs (des Starts), optimal.

Bis zur Umsetzung in die Anwendung müssen noch viele Fragen geklärt werden. Deshalb werden am TFD zahlrei-

che Strömungssimulationen und Experimente durchgeführt, um ein besseres Verständnis der Verdichteraerodynamik zu erreichen und die Grenzen des technisch Machbaren auszuloten. Auch Methoden des maschinellen Lernens werden im Hinblick darauf untersucht, ob sie zu einer Verbesserung des Auslegungsprozesses derartiger, fortschrittlicher Verdichter in Zukunft genutzt werden können.

### Fazit

Nachhaltigkeitsbemühungen haben in der Luftfahrt hohe Priorität. Gerade, weil noch offen ist, welche Technologien sich letztlich durchsetzen werden, ebnet die Forschungsarbeit im Exzellenz-Cluster SE<sup>2</sup>A Wege in eine nachhaltige und energieeffiziente Luftfahrt.

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume**  
**Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker**  
**Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach**  
**Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens**  
**Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick**  
**Dominik Blechschmidt, M. Sc.**  
**Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes**  
**Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe**  
**Dr. Steven Gronau**  
**Dr.-Ing. Dajan Mimic**  
**Dr.-Ing. Sven Scheffler**

→ Infos und Kontaktdaten  
ab Seite 68