



## ANGEWANDTE PHYSIK

# Nachhaltig durch die Luft

**Die Elektrifizierung der Luftfahrt kann den Flugverkehr umweltverträglicher machen und neue Mobilitätskonzepte ermöglichen.**

Mykhaylo Filipenko, Jochen Kaiser, Kay Plötner und Andreas Strohmayer

Die Idee des elektrischen Fliegens lässt sich bis in die 1970er-Jahre zurückverfolgen. Damals entstanden die ersten Prototypen batterieelektrischer Flugzeuge, als die Öl-Krise und der erste Bericht des „Club of Rome“ die E-Mobilität publik machten. Doch als die Preise für fossilen Treibstoff wieder fielen, verliefen die ersten Versuche im Sand. Das elektrische Fliegen findet erst seit Anfang des Jahrtausends wieder mehr Beachtung. Anlass waren erneut der gestiegene Ölpreis, aber auch die nun breite Verfügbarkeit der Lithium-

Ionentechnologie. Dass elektrisches Fliegen prinzipiell möglich ist, haben die früheren Versuche eindrucksvoll bewiesen. Nun gilt es zu zeigen, ob in absehbarer Zeit eine nennenswerte Reichweite möglich ist.

**N**eben der Corona-Krise steht die Flugzeugbranche vor der Herausforderung, die Emissionswerte der Personen- und Güterbeförderung signifikant zu reduzieren. Der Beitrag von Flugzeugen an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt derzeit etwa zwei Prozent, und die



◀ Der CityAirbus Demonstrator (hier: gerenderte Darstellung) verfügt über acht Propeller, die jeweils ein 200 kW-Motor von Rolls-Royce antreibt mit einem Dauerdrehmoment von 1300 Nm bei weniger als 50 Kilogramm Gewicht. Der Demonstrator befindet sich in der Flugerprobung; er soll im innerstädtischen Verkehr vier Personen mit 120 km/h bis zu 80 Kilometer weit transportieren.

baren Betriebskosten und erhöhter Zuverlässigkeit lassen sich Schadstoffemissionen eliminieren bzw. reduzieren. Außerdem ist es möglich, die Lärmbelastung im Umfeld des Flughafens deutlich zu senken.

Entsprechend ist die Entwicklung elektrischer Antriebstechnologie in den letzten zehn Jahren immer dynamischer erfolgt. So brachte Boeing 2008 ein zweisitziges Kleinflugzeug mit einer Brennstoffzelle in die Luft und zeigte damit, dass Wasserstoff ein emissionsfreies Fliegen ohne Batterie ermöglicht. Fünf Jahre später rüstete der österreichische Flugzeughersteller Diamond Aircraft zusammen mit der Siemens AG einen Zweisitzer vom Typ DA-36 hybrid-elektrisch um und flog damit erfolgreich. Das Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart demonstrierte im Sommer 2015 mit einem zweisitzigen Motorsegler, dem e-Genius (**Abb. 1**) die Alltagstauglichkeit des elektrischen Fliegens: Die Maschine flog von Stuttgart nach Mailand über die Alpen und – nach kurzem Wiederaufladen der Batterien – am selben Tag zurück. Für die 690 km lange Strecke kostete die gesamte Energie von 83 kWh nur 21 Euro; ein vergleichbarer konventioneller Flug bräuhete etwa 55 Liter Flugbenzin, die mit 115 Euro zu Buche schlagen. Batteriegetriebene elektrische Flugzeuge für zwei bis vier Passagiere befinden sich bereits in der Zertifizierungsphase und könnten in den nächsten Jahren auf den Markt kommen. Mittelfristig sind 10- bis 19-Sitzer geplant, die vermehrt hybrid-elektrische Antriebe nutzen, um höhere Reichweiten zu erzielen. In den nächsten zehn Jahren könnten größere Flugzeuge mit bis zu 100 Passagieren für den regionalen Flugverkehr in Planung gehen. Heute investieren alle namhaften Luftfahrtkonzerne in das elektrische Fliegen, und zahlreiche Start-ups drängen mit neuen Konzepten für die elektrische Antriebstechnik auf den Markt. Gerade die Start-ups werben damit, die Betriebskosten der Flugzeuge zu senken. Denn ein elektrisches Antriebssystem kann in der gesamten Wirkungskette von der Batterie bis zur Antriebswelle am Propeller einen Wirkungsgrad von bis zu 95 Prozent erreichen. Allerdings besitzen Batterien ein hohes Eigengewicht, das sich während des Flugs nicht reduziert – im Gegensatz zu einer Tankfüllung Kerosin. Dieser gegenläufige Effekt gleicht den deutlich schlechteren Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors von 25 bis 55 Prozent (je nach Leistungsklasse und Bauweise) teilweise aus, sodass der elektrische Antrieb halb so viel Energie für denselben Flug benötigt. Die Speichertechnologie stellt einen limitierenden Faktor des elektrischen Fliegens dar.

Die Breguet-Gleichung ist eine Grundgleichung beim Flugzeugentwurf [1]. Für batterie-elektrische Flugzeuge lässt sich für eine gegebene Flugzeugkonfiguration die maximale Reichweite  $R$  in Abhängigkeit der Energiedichte des elektrischen Speichers  $\epsilon_{\text{bat}}$  berechnen [2]:

Branche ist stetig um etwa vier Prozent pro Jahr gewachsen. Trotz kontinuierlich verbesserter Emissionswerte bei Flugzeugen und Triebwerken kann dieses Wachstum in den nächsten 15 Jahren zu einem signifikanten Anstieg der Gesamtemissionen aus der Luftfahrt führen. Daher hat die Europäische Kommission zusammen mit den führenden europäischen Unternehmen der Luftfahrtbranche ehrgeizige Ziele formuliert, um die Emissionen zu reduzieren: Mit dem Programm „Flightpath 2050“ sollen die Emissionen pro Passagierkilometer bis 2050 für  $\text{CO}_2$  um 75 Prozent, für  $\text{NO}_x$  um 90 Prozent und für Lärm um 65 Prozent sinken. Als Referenz dient das Bezugsjahr 2000 mit etwa 60 Gramm Emissionen pro Passagierkilometer. Zwar haben bisher Weiterentwicklungen in Aerodynamik und Antriebstechnologien dazu beigetragen, den Verbrauch und die Emissionen kontinuierlich zu senken. Angesichts des Wachstums im Luftverkehr reichen diese inkrementellen Verbesserungen aber nicht aus, um die Ziele von Flightpath 2050 zu erreichen. Elektrische und hybrid-elektrische Antriebe bieten dafür einen praktikablen Lösungsansatz. Einen elektrischen Antriebsstrang in eine speziell dafür ausgelegte Flugzeugkonfiguration zu integrieren, kann die Effizienz des gesamten Systems erhöhen. Bei vertret-



**Abb. 1** Der e-Genius – hier bei der Alpenüberquerung – verfügt über einen Elektromotor mit einer Dauerleistung von 40 kW am Leitwerk. In den Batterien sind 90 kWh elektrischer Arbeit gespeichert: Das reicht bei etwa 170 km/h für eine Strecke von über 400 Kilometern.

$$R = \frac{1}{g} \varepsilon_{\text{bat}} \frac{C_L}{C_D} \eta_{\text{tot}} \left( 1 - \frac{m_{\text{payl}} + m_{\text{empt}}}{m_{\text{MTOW}}} \right).$$

Dabei ist  $g$  die Fallbeschleunigung und  $\eta_{\text{tot}}$  der Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems inklusive der Propeller.  $C_L$  und  $C_D$  bezeichnen den Auftriebs- und Widerstandsbeiwert des Flugzeugs;  $m_{\text{empt}}$  ist die Leermasse des Flugzeugs,  $m_{\text{MTOW}}$  die maximale Startmasse und  $m_{\text{payl}}$  die maximale Nutzlast. Typische Erfahrungswerte für heutige Flugzeuge ( $C_L/C_D \approx 18$ ,  $(m_{\text{payl}} + m_{\text{empt}})/m_{\text{MTOW}} \approx 0,7$ ,  $\eta_{\text{tot}} \approx 0,8$ ) und realistische Werte für heutige Speichertechnologien (z. B. Li-Ionen-Batterien mit  $\varepsilon_{\text{bat}} \approx 150$  bis 200 Wh/kg) ergeben Reichweiten von 200 bis 300 Kilometern. Mit den höheren Energiedichten ( $\varepsilon_{\text{bat}} \approx 300$  bis 400 Wh/kg) durch verbesserte Speichertechnologien wie Lithium-Schwefel-Akkumulatoren ließen sich mittelfristig Reichweiten bis zu 500 Kilometern realisieren. Um 1000 bis 3000 Kilometer weit zu kommen, bedarf es Energiedichten von etwa 1000 Wh/kg und darüber hinaus. Prinzipiell können Lithium-Luft- oder Aluminium-Luft-Zellen diese Werte erreichen; bis zur Marktreife brauchen die Konzepte aber voraussichtlich noch 10 bis 15 Jahre.

Analog zum Güterverkehr mit Schiffen oder Zügen bieten Brennstoffzellen und Wasserstoff eine Alternative. Gehen das Gewicht einer heutigen Brennstoffzelle und des Wasserstoffspeichers in Form eines Flüssigwasserstofftanks in die Berechnung der Energiedichte ein, ergeben sich zwischen 500 und 700 Wh/kg als effektive Energiedichte. Das ermöglicht Reichweiten bis zu 700 Kilometern. Allerdings reduziert die Effizienz der Brennstoffzelle ( $\eta_{\text{FC}} \approx 0,6$ ) den Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{tot}}$ . Außerdem sind große Wärmetauscher notwendig, um die Verlustwärme abzuführen. Das führt zu weiteren aerodynamischen Verlusten, insbesondere bei hohen Fluggeschwindigkeiten. Gasförmig gespeicherter Wasserstoff benötigt ein voluminöses Tanksystem, das durch seinen hohen Luftwiderstand die Aerodynamik weiter verschlechtert. Entwürfe von Airbus und dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum haben 2003 gezeigt, dass der zusätzliche Luftwiderstand im Vergleich zu einem konventionell angetriebenen Flugzeug bis zu zehn Prozent betragen kann. In neuesten Studien führt die Kombination mit einer Teilelektrifizierung zu wesentlich besseren Werten.

## Kurze Strecken, wenige Passagiere

Die mit der heutigen Technik realisierten Reichweiten sind bereits praktisch nutzbar. Beispiele sind emissionsfreie Trainingsflugzeuge wie der eFlyer 2 von Bye Aerospace und elektrifizierte Erprobungsträger wie die Extra 330LE. Denkbar sind auch Flüge mit wenigen Passagieren auf kurzen Distanzen, dem Marktsegment der „Commuter“. Verschiedene Hersteller haben in jüngster Vergangenheit neue Konzepte und Retrofit-Ideen präsentiert. Commuter-Flugzeuge eignen sich, wo eine landgebundene Infrastruktur aus Bahngleisen und Straßen nur schwer zu bauen und aufrechtzuerhalten ist. Das ist beispielsweise in Russland der Fall: Die Größe des Landes erlaubt keine flächen-deckende Erschließung, und die extremen jahreszeitlichen Unterschiede treiben die Kosten für die Instandhaltung in die Höhe. In vielen lateinamerikanischen Ländern, wie Kolumbien oder Chile, prägen Gebirge die Landschaft so stark, dass eine landesweite Infrastruktur nicht finanzierbar ist. Zwischen den großen Metropolen dieser Länder herrscht heute bereits reger Flugverkehr; Commuter-Flugzeuge könnten auch kleinere Orte verbinden. Aufgrund ihrer Kurzstart- und -landefähigkeit könnten elektrische Varianten vorhandene Flughäfen nutzen, die bisher nicht voll ausgelastet sind, und kleinere, regionale Anlagen wiederbeleben. Der niedrige Verbrauch und die vergleichsweise geringe Lärmbelastung machen solche Flüge auch finanziell für eine breitere Masse attraktiv und eröffnen den Menschen im Umland neue, umweltverträgliche Reisewege.

## Elektrische Helikopter für die Stadt

Seit einigen Jahren stehen auch elektrisch angetriebene, senkrecht startende Fluggeräte, sogenannte eVTOL, im Fokus der Entwicklung. Sie sollen dabei helfen, den innerstädtischen Verkehr zu entlasten. Mehr als 200 Unternehmen wetteifern um ihre Entwicklung. Darunter finden sich etablierte Luftfahrtunternehmen wie Airbus oder Bell Helicopters sowie Automobilhersteller wie Hyundai oder Porsche und viele Start-ups wie VoloCopter oder Joby Aviation. Der Prototyp von VoloCopter flog erstmals 2013; Airbus hat verschiedene Urban Air Mobility Demonstratoren entwickelt, beispielsweise den CityAirbus (**Abb.** auf S. 34/35). Um eVTOLs kommerziell einzusetzen, gilt es nicht nur, die Fluggeräte und elektrischen Antriebe zu entwickeln, sondern auch eine Infrastruktur zu planen, die ausreichend Starts und Landungen pro Stunde ermöglicht. Dafür gibt es bereits einige Konzepte und erste Demonstratoren (**Abb. 2** oben). Die Vertiports oder Vertistops müssen insbesondere die Zulassungsbedingungen von Helikopterlandeplätzen (**Abb. 2** unten) erfüllen. Hier startet und landet jedes Fluggerät auf einer dezidierten Fläche. Ihre Größe und Form hängt vom Durchmesser des Rotors und der Gesamtgröße des eVTOL ab. Sicherheitszonen garantieren eine versetzte und sichere Landung. Aktuelle Designstudien wie der Multikopter VoloCopter 2X mit einem Rotorendurchmesser von 9,15 Metern oder der Joby S4 mit 13,11 Metern brauchen rechteckige Flächen mit Kantenlängen zwischen 20 und 30 Metern. Weitere Starts und Landungen sind nur

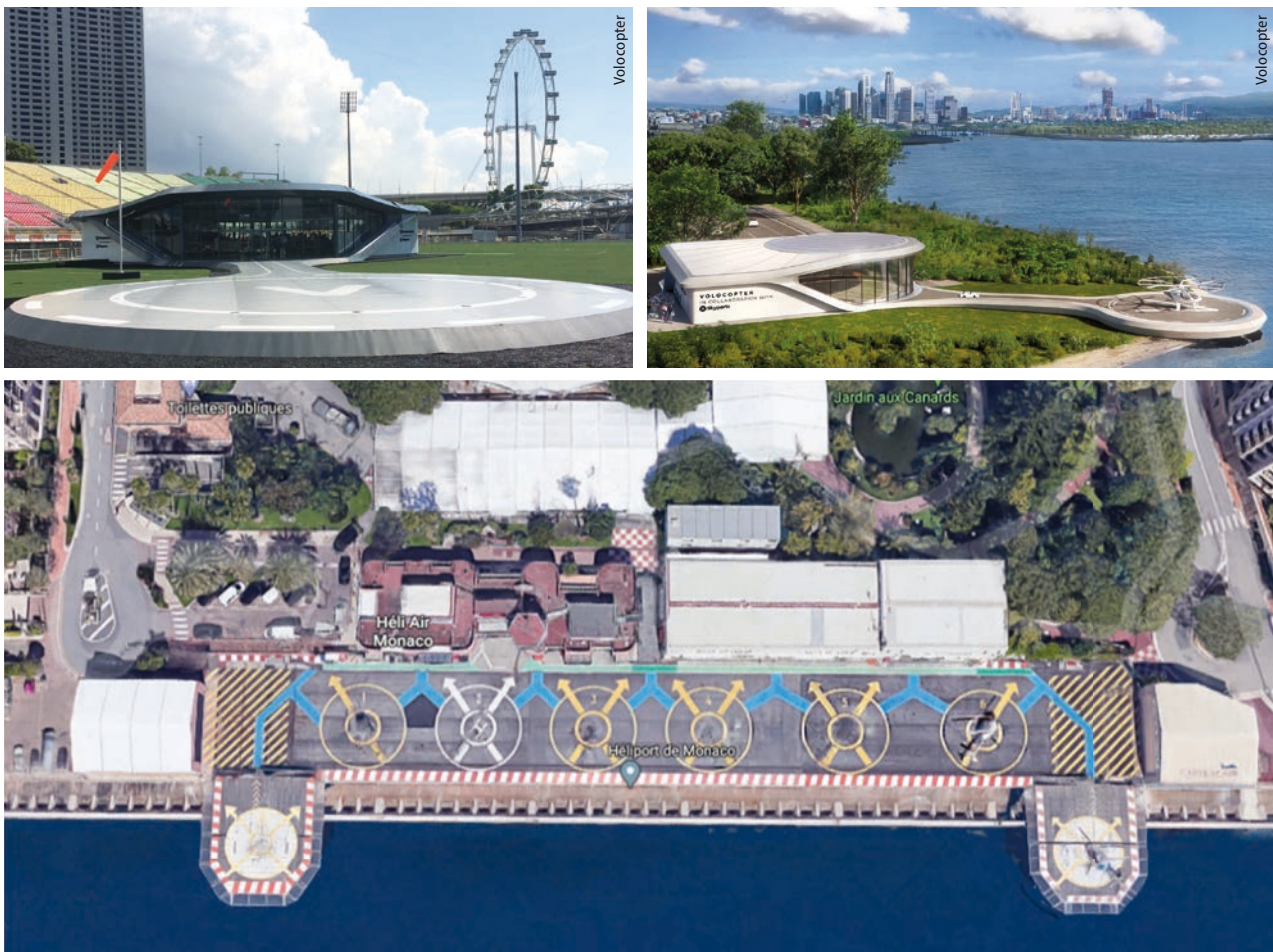
möglich, wenn es Parkflächen sowie verbindende Rollwege gibt, wobei jede Parkfläche für das größte der möglichen Fluggeräte ausreichen muss. Hinzu kommt der Platz, um Passagiere abzufertigen, die Batterien zu laden und die eVTOL zu warten. Aktuelle Studien gehen davon aus, dass an einem Vertiport etwa alle 30 bis 90 Sekunden Starts und Landungen möglich sein könnten [3].

Bezüglich der Ladeinfrastruktur sind verschiedene Konzepte denkbar. So ließe sich ein Schnellladesystem ebenso realisieren wie ein Austauschen der Batterien nach jedem Flug. Beispielsweise nimmt bei der Magnus eFusion ein „battery swap“ nur wenige Minuten in Anspruch. Sowohl die benötigten Parkflächen als auch die Kosten für die Ladeinfrastruktur hängen von der realisierbaren Laderate ab. Sollen bereits existierende Gebäude umfunktioniert werden, gilt es, Lösungen für die Energieversorgung und die Integration in die Energienetze zu entwickeln. Außerdem dürfen die Vertiports die Bevölkerung nur minimal durch Lärm und Sichtbarkeit beeinträchtigen. Dafür sind einerseits geringe Lärmsignaturen von eVTOLs und andererseits die Flugführung entscheidend, die entlang bestehender Infrastrukturen aus Straßen und Schienen führen könnte. Dabei gilt es, einen Kompromiss zwischen der Effizienz der Route im Vergleich zum Direktflug und den Auswirkungen auf Betroffene zu finden. Gleichzeitig sind Sicherheitsanfor-

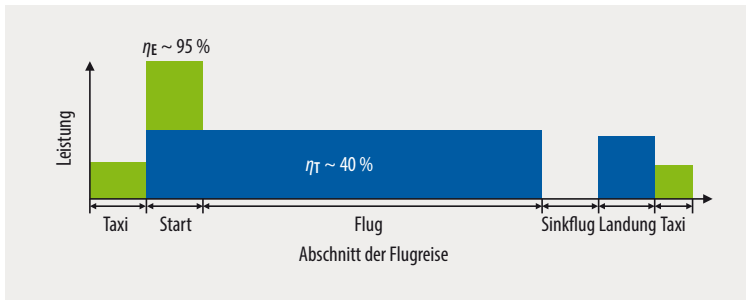
derungen und Zulassungsregularien ähnlich der heutigen Luftfahrt einzuhalten.

Die zukünftige Rolle der eVTOL im urbanen Verkehrsträgermix hängt sicherlich auch vom Preis des Transportangebots ab. Hier ist entscheidend, wie gut sich der Betrieb der Fluggeräte automatisieren lässt und wie hoch die Anteile des motorisierten Individualverkehrs und des öffentlichen Personennahverkehrs in einer Stadt ausfallen. Beispielsweise entfallen in der Metropolregion München durchschnittlich 56 Prozent der etwa 14 Millionen täglichen Fahrten auf den PKW [4]. Erste Studien sagen hier voraus, dass der Marktanteil der eVTOL etwa ein Prozent erreichen könnte [5]. Damit ergänzen die Flugtaxis zwar den aktuellen Verkehrsmix, tragen aber nicht dazu bei, Staus zu reduzieren.

Abhängig vom Einsatz eines eVTOL innerhalb der Stadt, in Metropolregionen oder zwischen Städten unterscheiden sich die Anforderungen an Reichweite und Fluggeschwindigkeit, sodass sehr unterschiedliche Konfigurationen zu erwarten sind. Die energieintensiven Schwebeflugphasen bei Start und Landung machen voll-elektrische Antriebssysteme nur auf kürzeren Strecken anwendbar, weil die Speicherkapazitäten für Senkrechtstart und -landung sowie den Reiseflug inklusive Sicherheitsreserven ausreichen müssen. Insbesondere Multikopterkonfigurationen, die ohne aerodynamische Auftriebsflächen auskommen,



**Abb. 2** Auf dem Intelligent Transport Systems (ITS) World Congress wurde 2019 in Singapur erstmals ein Vertiport präsentiert, ein Flughafen für Flugtaxis (oben). In Monaco existiert bereits ein Helikopterflughafen mit zwei Start- und Landeflächen (links und rechts außen) sowie sechs Parkflächen, Rollwegen und Servicegebäuden.



**Abb. 3** Typischerweise deckt ein Flugzeug seinen Leistungsbedarf beim Start und Reiseflug mit der Turbine (blau). Die Batterie kommt am Boden zum Einsatz und dient beim Start als sogenannter Booster (grün).

bleiben auf kurze Reichweiten beschränkt und eignen sich vor allem für den innerstädtischen Verkehr [6]. Beispielsweise sollen in Paris während der Olympischen Spiele 2024 in einem Pilotprojekt Passagiere vom Flughafen Charles-de-Gaulle mit eVTOLs in die Innenstadt gebracht werden. Für längere Strecken, z. B. von Berlin nach Potsdam oder von Bonn nach Köln, sind dagegen Konfigurationen mit schwenkbaren Rotoren und/oder Flügeln besser geeignet.

### Länger fliegen mit Hybrid

Längere Flüge ermöglicht ein hybrid-elektrisches anstelle eines rein elektrischen Antriebssystems. Dabei erzeugt die sogenannte Electric Propulsion Unit den Schub, während ein GenSet aus Turbine und Generator sowie eine Batterie dazu dienen, Energie zu speichern und umzuwandeln. Dabei sind vor allem serielle und parallele Hybride gängige Konzepte (**Infokasten**). Im Vergleich zu einem konventionellen Antrieb aus Turbine, Getriebe und Propeller sollte

der Wirkungsgrad der hybrid-elektrischen Antriebskette aus Turbine, Generator, Gleichrichter, Kabeln, Wechselrichter, Motor, Getriebe und zweitem Motor schlechter ausfallen, da der Wirkungsgrad  $\eta$  jeder einzelnen Komponente weniger als 100 Prozent beträgt. Dieser inhärente Nachteil lässt sich durch synergetische Effekte im Gesamtsystem abmildern. Einen vielversprechenden Ansatz stellen verteilte Antriebe dar, die erst mit Elektromotoren möglich werden. Konventionelle, kraftstoffbasierte Antriebe vereinen die Umwandlung der Energie und die Erzeugung des Schubs in einem Aggregat. Dieses wandelt die im Kraftstoff gebundene chemische Energie in Rotations- und Wärmeenergie um und treibt mit mechanischer Wellenleistung einen Propeller an, der wiederum einen Luftmassenstrom beschleunigt. Zusätzlicher Schub entsteht, wenn die thermische Energie im Abgasstrahl genutzt wird. Elektrische Antriebe erlauben es, die chemische Umwandlung räumlich von der Erzeugung des Vortriebs zu trennen. Daher lassen sich die vergleichsweise kleinen Elektromotoren an bisher schwer zugänglichen Positionen einbauen.

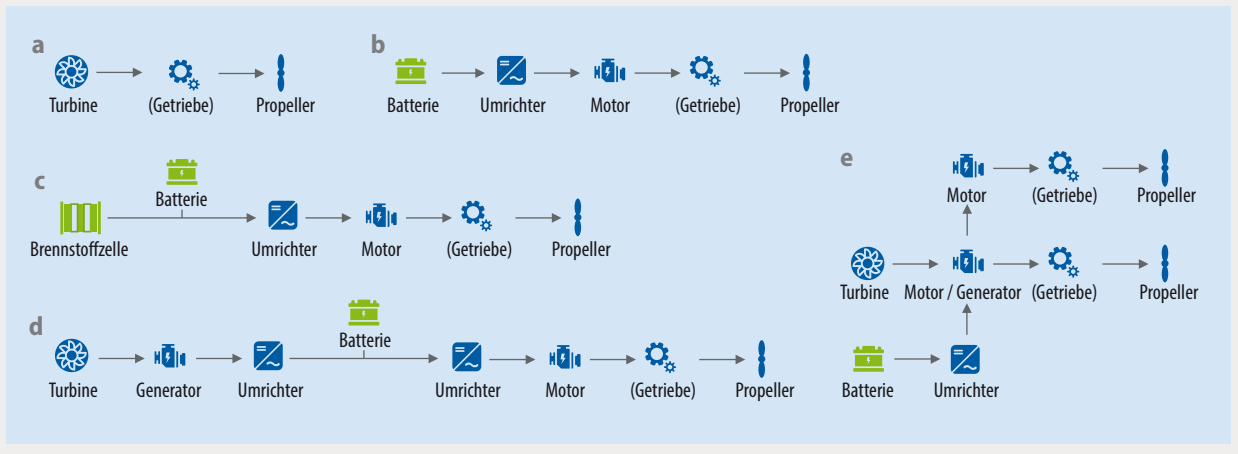
Daraus ergeben sich verschiedene synergetische Ansätze. Beispielsweise lässt sich bei mehreren am Tragflügel verteilten Antrieben die Strahlenergie nutzen. Beim sogenannten Coanda-Effekt entsteht ein besonders hoher Auftrieb an der hinteren Kante des Tragflügels, wenn Hochauftriebshilfen in der von den Propellern beschleunigten Strömung positioniert werden. Das verbessert die Eigenschaften beim langsamen Flug und für kurze Landungen. Antriebe am Ende der Tragflächen können mit differentiellem Schub die Steuerung des Flugzeugs um die Hochachse unterstützen oder sogar übernehmen. Befinden sich die Antriebe hinter den aerodynamischen Flächen, verringert sich der Luftwiderstand des Fluggeräts, weil die Antriebe die

## Antriebsarten im Überblick

Bei einem **konventionellen Antrieb** (a) passt ein Getriebe die Drehzahl von Turbine oder Kolbenmotor für den Propeller an. Entsprechend sorgt bei einem **rein elektrischen System** (b) ein Elektromotor für die Bewegung des Propellers, während der Motor über einen Umrichter von einer Batterie gespeist wird. Für höhere Reichweiten sorgt eine

**zusätzliche Brennstoffzelle** (c): Dabei fängt die Batterie die Leistungsspitzen ab, weil sich die Brennstoffzelle dazu nicht schnell genug regeln lässt. Ein **hybrid-elektrisches System** ergibt sich als Mischform aus konventionellem und rein elektrischem Antrieb. Die häufigsten Varianten sind ein **serieller Hybrid** (d) mit räumlicher Trennung von

Energie und Schuberzeugung und ein **paralleler Hybrid** (e). Hier befindet sich die elektrische Maschine zwischen Turbine und Propeller: Sie kommt sowohl motorisch als Booster zum Einsatz als auch generatorisch, um weitere Elektromotoren anzutreiben.



turbulente Grenzschicht beeinflussen und die „Nachlauf-delle“ der Umströmung auffüllen. Der Luftmassenstrom des Antriebs beschleunigt die Strömung, die hinter dem aerodynamischen Körper normalerweise verwirbelt und verzögert ist, sodass sich Zusatzwiderstände deutlich verringern. Vergleichbar mit Technologien bei Automobilen erlauben elektrische Antriebe bei Fluggeräten das „energy harvesting“, bei dem Energie rekuperiert wird. Ein effizientes, elektrisch angetriebenes Flugzeug wird daher signifikant anders aussehen als die heute geläufigen Fluggeräte.

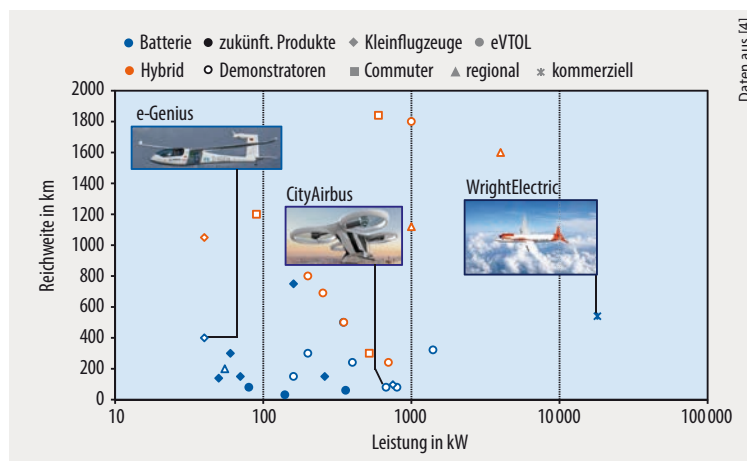
Studien belegen, dass die neuen Freiheitsgrade beim Entwurf des Flugzeugs die Nachteile durch die höhere Masse des Antriebssystems überkompensieren können [7]. Insgesamt ergeben sich so beim Verbrauch und bei den Emissionen Vorteile gegenüber einer nicht-hybriden Konfiguration, die Einsparungen bis zu 70 Prozent gegenüber dem heutigen Stand der Technik ermöglichen. Dafür stellen sehr leichte und gleichzeitig sehr effiziente Antriebskomponenten eine wesentliche Voraussetzung dar.

### Leichte und effiziente Antriebe

Bei heutigen Flugzeugen macht das Antriebssystem etwa 15 Prozent der gesamten Masse aus, da Gasturbinen hohe Leistungsgewichte von 6 bis 8 kW/kg aufweisen. Diese Werte mit alternativen Systemen zu erreichen, ist eine Herausforderung. Die leichtesten elektrischen Flugzeugmotoren wie ein 260-kW-Prototyp von Rolls-Royce besitzen Leistungsgewichte von mehr als 5 kW/kg, allerdings bleiben dabei Umrichter, Kabel und andere Komponenten unberücksichtigt. Um das gesamte System kompakter zu bauen, bietet es sich an, sowohl die Systemarchitektur im Zusammenspiel der Komponenten zu optimieren als auch Masse und Volumen jeder einzelnen Komponente mithilfe numerischer Berechnungen und Optimierungen zu minimieren. Zusätzlich erlauben neue Materialien, beispielsweise verbesserte Halbleiter, höhere Schaltfrequenzen und Sperrspannungen, sodass kompaktere Umrichter realisierbar sind. In Kabeln und elektrischen Maschinen lassen sich mit Supraleitern deutlich höhere Stromdichten realisieren als beim Einsatz von Kupfer, was diese ebenfalls leistungsdichter und effizienter machen könnte.

Um Emissionen zu reduzieren, sollte die Konfiguration des Flugzeugs auf den hybrid-elektrischen Antrieb optimiert sein. Hohe Leistungen braucht es normalerweise nur beim Start (Abb. 3). In dieser Phase stellen Batterie und Turbine gemeinsam die benötigte Energie zur Verfügung, während beim Reiseflug nur die Turbine arbeitet. Je kleiner das Verhältnis der Zeiten für Reiseflug und Start, desto höher ist der Anteil rein elektrischen Fliegens und desto stärker sinken die Emissionen.

Je nach Leistungsklasse unterscheidet sich der Reifegrad der Technik. Im Bereich einiger Megawatt konzentriert sich der „E-Fan X ground test“ auf die Komponenten des Antriebs. Das gesamte System soll am Boden nachweisen, dass elektrische Antriebe bei diesen Leistungen machbar sind. Das M250h-Programm von Rolls-Royce hat dagegen zum Ziel, einen luftfahrtzertifizierten, hybrid-elektrischen Antriebsstrang mit einer Leistung von 500 kW zu entwickeln.



**Abb. 4** Elektrische (blau) und hybrid-elektrische (orange) Flugzeuge sind als Produkte geplant (ausgefüllte Symbole) bzw. laufen als Demonstratorprogramme (weiß-gefüllte Symbole). Die Projekte decken verschiedene Leistungs- und Reichweiteklassen ab.

Dieser soll zunächst an Bord eines speziellen Kleinflugzeugs getestet werden: Der Apus i-5 legt den Fokus auf besonders leises Fliegen. Derzeit gibt es eine Vielfalt an elektrischen und hybrid-elektrischen Demonstratoren und geplanten Produkten (Abb. 4). Für Kleinflugzeuge und Commuter gibt es sowohl elektrische als auch hybrid-elektrische Konzepte, während für Regionalflugzeuge hauptsächlich hybrid-elektrische Konzepte betrachtet werden.

### Kombination mit alternativen Kraftstoffen

Auch die Infrastruktur am Flughafen muss sich der Art der Hybridisierung anpassen. Wie bei den Vertiports stellt sich die Frage, ob die Batterien nach jedem Flug zu tauschen sind und welche Leistung zum Aufladen der Batterien gebraucht wird. Gerade kleinere Flughäfen in abgelegenen Regionen oder auf kleinen Inseln, die sich sinnvoll durch elektrische Commuter-Flüge erreichen lassen, verfügen oft nicht über die notwendigen Energienetze. Ein entsprechender Ausbau der Stromnetze sollte mittels emissionsarmer Techniken erfolgen, beispielsweise basierend auf erneuerbaren Energien.

Hybrid-elektrische Antriebssysteme können aufgrund der fehlenden Energiespeicher auch in Zukunft nur schwer die Anforderungen von Langstreckenflügen erfüllen. Hier bieten sich alternative, synthetische Kraftstoffe oder Wasserstoff in Gasturbinen als Mittel an, um Emissionen deutlich zu reduzieren. Darauf setzt auch Airbus beim ZERO-E-Programm, das bis 2035 einen wasserstoffbetriebenen Personenjet bis zur Marktreife bringen soll. Auch diese Konzepte basieren auf einem höheren Grad der Elektrifizierung: Mit Wasserstoff, eingesetzt in Brennstoffzellen, lassen sich die üblichen Hilfsgasturbinen ersetzen. Ebenfalls sinnvoll ist die Kombination von Wasserstoff und der Boundary Layer Ingestion. Sie beeinflusst die Grenzschicht am Rumpf, indem ein Propulsor den Impulsverlust im Nachlauf kompensiert (Abb. 5). In diesem Fall verbessern die zusätzlichen Flüssigwasserstofftanks trotz des wachsenden Querschnitts des Flugzeugrumpfs die Effizienz. Beim sogenannten Green Taxiing ermöglicht es eine bodennahe



**Abb. 5** Bei diesem Konzept eines wasserstoffangetriebenen Langstreckenflugzeugs fällt der große Rumpf auf, in dem sich die Wasserstofftanks befinden, und der Propulsor am Rumpfheck, mit dem der Widerstand der Grenzschicht beeinflusst wird.

Teilelektrifizierung, mit einem elektrischen Motor im Fahrwerk vom Gate zur Landebahn und umgekehrt zu rollen.

Nicht zuletzt gibt es auch bei klassischen Gasturbinen noch Einsparpotenzial. So verbraucht das Ultra-Fan-Triebwerk von Rolls-Royce 15 Prozent weniger Treibstoff als die derzeit eingesetzte „Trent XWB“-Turbine, weil ein Getriebe zwischen Propeller und Gasturbine ein höheres Nebenstromverhältnis ermöglicht. Das Nebenstromverhältnis entspricht dem Verhältnis des „kalten“ Luftmassenstroms, den der Propeller bewegt, und des „heißen“ Massenstroms durch das Kerntriebwerk. Komplexere Technologien wie der Einsatz von Wärmerückgewinnung oder alternative Kreisprozesse wie der Joule-Brayton-Prozess könnten zu weiteren Einsparungen führen.

### Zusammenfassung

Elektrische Antriebssysteme ermöglichen es, Flugzeuge neu zu konfigurieren und damit mittel- bis langfristig neue Marktsegmente zu erschließen. Damit dies zur re-

duzierten Emission von Abgasen und Lärm führt, sollte die gesamte Wertschöpfungskette nachhaltig gestaltet sein. Insbesondere gilt es, die elektrische Energie möglichst emissionsarm zu erzeugen und die Speichermaterialien belastungsarm zu gewinnen. Dann stellen Elektrifizierung und Hybridisierung eine Alternative dar zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Gasturbine und zu alternativen Kraftstoffen. Synergien ergeben sich dabei, weil ein hybrid-elektrisches Flugzeug auch von einer verbesserten Gasturbine profitiert, die alternative Kraftstoffe nutzt.

Vor diesem Hintergrund zeichnet sich in der Forschung die Route ab, auf der die Luftfahrt einen spürbaren Beitrag zu den Klimazielen leisten könnte. Ausgehend von einer schnellen Markteinführung elektrischer und hybrid-elektrischer Kleinflugzeuge führt der Weg zu einem engmaschigen Netzwerk kleiner Commuter-Flugzeuge, eventuell ergänzt durch intra- und interurbane Flugtaxi-Angebote. Langfristige Ziele sind ein hybrid-elektrischer Regionalverkehr und Langstreckenflüge in Großraumflugzeugen – angetrieben von ultra-effizienten Gasturbinen, die CO<sub>2</sub>-neutrale alternative Kraftstoffe nutzen und auf neuartigen thermodynamischen Kreisprozessen beruhen.

### Literatur

- [1] E. Torenbeek, *Synthesis of Subsonic Airplane Design*, Delft University Press, Delft (1982)
- [2] S. Sahoo et al., *Aerospace* 7, 44 (2020)
- [3] D. Duwe et al., *Quo Vadis 3D Mobility*, hrsg. von Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO (April 2020)
- [4] M. Fu, A. Straubinger und J. Schaumeier, *Scenario-based Demand Assessment of Urban Air Mobility in the Greater Munich Area*, AIAA Aviation 2020 Conference, Reno, Nevada, USA (2020)
- [5] P. D. Vascik und R. J. Hansman, Report No. ICAT-2017-02, Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics (2017), PDF: [hdl.handle.net/1721.1/106937](https://hdl.handle.net/1721.1/106937)
- [6] A. Gnadt et al., *Progress in Aerospace Sciences* 105, 1 (2019)
- [7] M. Hepperle, *Electric Flight – Potential and Limitations*, in: AVT-209 Workshop on „Energy Efficient Technologies and Concepts Operation“, Lisbon (2012)

## Die Autoren



**Mykhaylo Filipenko** (FV Teilchenphysik) hat an den Universitäten Regensburg und Erlangen Physik studiert und promovierte nach Forschungsaufenthalten am Fermilab und NIKHEF in experimenteller Teilchenphysik. Seit 2015 entwickelt er elektrische Antriebstechnik für Luftfahrzeuge. 2020 geht er in einem Sabbatical seinem Hobby, der Akrobatik, nach.



**Jochen Kaiser** studierte Maschinenbau mit Schwerpunkt Luft- und Raumfahrt an der TU Braunschweig und promovierte an der TU Darmstadt. Er arbeitete 14 Jahre lang bei der Airbus Defence & Space GmbH und leitet seit 2016 das Team „Visionäre Flugzeugkonzepte“ am Bauhaus Luftfahrt.

**Kay Plötner** studierte und promovierte an der TU München im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik. Seit 2010 arbeitet er am Bauhaus Luftfahrt in Taufkirchen, wo er seit 2016 das Team „Ökonomie und Verkehr“ leitet.



**Andreas Strohmayr** hat an der TU München Luft- und Raumfahrttechnik studiert und auf dem Gebiet des Flugzeugvorentwurfs promoviert. Nach 14 Jahren in der Industrie ist er seit 2015 Professor für Flugzeugentwurf an der U Stuttgart mit den Forschungsschwerpunkten Elektrisches Fliegen und Unbemannte Fluggeräte. Seit 2019 ist er Chairman des „European Aeronautics Science Network“ (EASN).



**Dr. Mykhaylo Filipenko**, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München, **Dr.-Ing. Jochen Kaiser** und **Dr.-Ing. Kay Plötner**, Bauhaus Luftfahrt e. V., Willy-Messerschmitt-Str. 1, 82024 Taufkirchen, **Prof. Dr.-Ing. Andreas Strohmayr**, Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB), Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart (Vaihingen)