

Auf dem Weg zum klimafreundlichen Fliegen

Gastbeitrag von Theo Rindlisbacher, BAZL

Tags: Energiespeicher als Problem / Elektro-Antrieb / Batterien schwerer als Flugzeug / Hybridantriebe / Wasserstoff / Verbesserung der Triebwerke / synthetische Treibstoffe

Mobilität verbraucht Ressourcen und verursacht Umweltbelastung. Dies gilt auch in der Luftfahrt. Wie kann hier die Umweltbelastung reduziert werden? Die einfachste Massnahme wäre eine Reduktion des Konsums. Aber so einfach ist es nicht. Luftfahrtsysteme sind besonders stark gekoppelt an wirtschaftliche Prosperität. Gerade in Schwellenländern ist der Aufstieg Hunderter Millionen Menschen in den Mittelstand stark verbunden mit dem Wachstum des Luftverkehrs. Global wird der Konsum deshalb zunehmen, und es braucht grosse Anstrengungen, um Flugtransporte in Zukunft umweltfreundlicher durchführen zu können. In der Tat ist die Suche nach Lösungen, um beispielsweise die Klimawirkung des Luftverkehrs global zu reduzieren, auch im BAZL zu einer wichtigen Aufgabe geworden. Dabei spielen die Antriebstechnologie und damit zusammenhängend die Energieträger eine bedeutende Rolle. Das BAZL wagt hier einen Ausblick in die Zukunft.

Technisch gesehen müssen für Flugzeuge folgende grundsätzlichen Eigenschaften beachtet werden: Die Energie, die ein Flugzeug für seinen Flug benötigt, muss bereits zu Beginn der Reise in Form eines geeigneten Energiespeichers an Bord sein. Um lange Flugstrecken mit Passagieren und Fracht zurücklegen zu können, muss die Energieeffizienz eines Flugzeuges entsprechend hoch sein. Dies bedeutet auch, dass die verwendeten Energiespeicher nicht zu viel wiegen dürfen, da jedes zusätzliche Kilogramm mit mehr Schub kompensiert werden muss. Flugzeugturbinen sind im Verhältnis zu ihrer Leistung verhältnismässig leicht und gehören zu den effizientesten Verbrennungsmotoren überhaupt. Aber: Sie produzieren lokal gasförmige Emissionen und beeinflussen die Zusammensetzung der Atmosphäre.

Energiespeicher als Problem

Wenden wir uns deshalb zuerst dem Elektroantrieb zu, welcher lokal, während des Fluges emissionsfrei arbeiten würde und deshalb aus Klimasicht zu bevorzugen wäre. Wie sieht es also mit der Realisierbarkeit rein elektrischer Passagierflugzeuge heutiger Grösse aus? Der Energieinhalt in einem Kilogramm Kerosin ist rund 60 Mal höher als bei den besten zurzeit einsetzbaren aufladbaren Batterien. Gleichzeitig ist das benötigte Volumen bei heutigen Batterien mindestens 20 Mal grösser als bei Kerosin, um die gleiche Menge Energie unterzubringen.

Ein Elektro-Airbus A320 mit 180 Sitzen benötigte auch mit Batterien der doppelten heutigen Energiedichte eine Batteriemasse von etwa 85 Tonnen, um beispielsweise die Energie für einen Flug von Zürich nach Oslo an Bord zu haben. Der heutige A320 hat beim Start total eine Masse von etwa 65 Tonnen. Damit wären also alleine die Batterien schwerer als das gesamte heutige Flugzeug. Das BAZL schätzt, dass selbst eine Steigerung des heutigen Energieinhalts von Hochleistungsbatterien um den Faktor 5 noch nicht ausreichend wäre, um Flugzeuge in sinnvollen Einsatzbereichen rein elektrisch zu betreiben.

Der Realisierung von rein elektrischen, kommerziell betriebenen Passagier- und Frachtflugzeugen steht also zurzeit die Energiedichte (Energieinhalt pro Masse und pro Volumen) von den für den Elektroflug benötigten Batterien im Weg. Schwierige technische Herausforderun-

gen sind auch die benötigten hohen elektrischen Antriebsleistungen bei grossen Passagierflugzeugen und die Anforderung für schnelles Aufladen mit sehr grossen Energiemengen. Die Umweltbilanz würde insbesondere bei den Batterien von deren Lebensdauer, der Herstellung und Wiederverwertung und von der Umweltauswirkung für die Bereitstellung der elektrischen Energie für das Aufladen abhängen. Im Beispiel oben kann ein konventioneller Airbus die Flugstrecke viele Hundert Male fliegen, bis so viel CO₂ aus der ganzen Kerosinherstellung und Kerosinverbrennung in die Atmosphäre emittiert wurden, wie die Herstellung des Batterieatzes verursacht hat¹.

Hybridantriebe im Test

Im Bereich der elektrischen Antriebe für grössere Flugzeuge sind Hybridantriebe in den kommenden Jahrzehnten am ehesten umsetzbar und Entwicklungen werden von allen grösseren heutigen Triebwerkherstellern verfolgt (General Electrics (GE) und Safran, Rolls-Royce, Pratt&Whitney, Honeywell).

Hybridkonzepte für Flugzeuge verwenden als Hauptenergiespeicher nach wie vor Kerosin und zusätzlich Batterien sowie bei seriellen Hybriden elektrisch angetriebene Turbinen. Mögliche Vorteile solcher Konzepte sind voraussichtlich ein etwas geringerer Treibstoffverbrauch, weniger Schadstoffemissionen, ein emissionsfreier Betrieb am Boden und weniger Lärm am Flughafen. Um Möglichkeiten und Grenzen genauer auszuloten, arbeiteten Airbus und Rolls-Royce bis Anfang 2020 an einem Hybrid-Antriebsstrang mit 2 MW² Leistung (Projekt E-Fan X)³. Der Hybrid-Antrieb sollte in ein altes Regionalflugzeug vom Typ BAE-146 eingebaut werden («Jumbolino»), wobei eines der vier konventionellen Triebwerke durch ein elektrisches Triebwerk von 2 MW Leistung ersetzt wurde. Der Erstflug war für das Jahr 2021 geplant. Eine Leistung von 2 MW ist indessen erst etwa 5% der Leistung, welche beispielsweise ein Airbus A320 beim Start benötigt.⁴ Die genauen Gründe für den Stopp des Projekts wurden nicht kommuniziert.

Es ist festzuhalten, dass das Hochskalieren der Antriebsleistung von tiefer zu hoher Leistung nicht linear möglich ist. Honeywell, welche im Marktsegment der kleineren Gasturbinen arbeitet (Turbofantriebwerke für Businessjets, Helikopterturbine, Hilfsaggregate) sieht in Hybridkonzepten beginnend bei kleinen Fluggeräten durchaus eine Zukunft. Allerdings zeigen ihre Analysen, dass im Vergleich zu einem einmotorigen heutigen Helikopter bei einem Hybrid ähnlicher Grösse die Zuladung etwa auf die Hälfte sinkt, und bei einem rein elektrischen Gerät auf etwa einen Achtel. Dies zeigt auch hier das grundsätzliche Energiedichte-Problem solcher Antriebe. Honeywell und GE erwarten erste brauchbare Hybridflugzeuge deutlich nach 2030.

Lösung für Kleinflugzeuge

Für kleine Flugzeuge, welche mit wenig Reichweite auskommen und kleine Antriebsleistungen benötigen, gibt es heute schon Nischenanwendungen für reine Elektroantriebe. So subventioniert das BAZL einen Feldversuch mit zweiseitigen elektrischen Schulflugzeugen, welche zumindest sehr lärmarmes Pilotentraining an Flugplätzen und in Flugplatznähe ermöglichen. Auch die Entwicklung von Hybridantrieben und Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektroantrieben für Kleinflugzeuge wird seitens BAZL aktuell unterstützen, um das Reichweitenproblem elektrischer Antriebe zu entschärfen. Ferner ist auch der Einsatz von Biomechanik denkbar. Es ist indessen noch unklar, wie die gesamte Umweltbilanz solcher Konzepte für Kleinflugzeuge aussieht.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass ein Batterieantrieb grösserer Passagierflugzeuge auf längere Sicht nicht möglich sein wird.

¹ Für Details siehe das Faktenmaterial Elektrisches Fliegen des BAZL.

² 2 MW (Megawatt) = 2000 kW (ca. 2600 PS)

³ www.airbus.com → Innovation → Future technology → Electric flight → E-Fan X

⁴ Angabe BAZL. Dieser Wert kann mittels der benötigten Schubkraft, aus der Impulsgleichung oder auch aus dem Kerosinverbrauch und Antriebswirkungsgrad berechnet werden.

Wasserstoff als Antrieb der Zukunft?

Wie steht es mit Wasserstoffantrieben? Wasserstoff kann direkt aus Strom und Wasser hergestellt werden und seine Verbrennung erzeugt kein CO₂. Stammt der Strom direkt aus erneuerbaren Quellen, so kann eine CO₂-Reduktion erzielt werden. Im Jahre 1988 baute der russische Flugzeughersteller Tupolev ein Flugzeug des Typs TU-154 um, so dass es mit flüssigem Wasserstoff betrieben werden konnte (Bezeichnung TU-155). Der Flugzeughersteller Tupolev demonstrierte damit die prinzipielle Machbarkeit eines Wasserstoffflugzeuges.

Ein Kilogramm Wasserstoff enthält fast drei Mal so viel Energie wie ein Kilogramm Kerosin, jedoch ist das dafür benötigte Speichervolumen sehr gross und deshalb das Hauptproblem für die Mitnahme in einem Flugzeug. Das Wasserstoffvolumen muss für die Speicherung im Flugzeug auf ein Minimum verkleinert werden. Die Speicherung bei sehr hohen Drücken (um 700 bar), wie sie bei ersten käuflichen Wasserstoffautos angeboten wird, kommt für Flugzeuge mit entsprechendem Reichweitenbedarf nicht in Frage. Die Tanks wären für die benötigte Energiemenge immer noch viel zu gross und viel zu schwer.

Eine wesentlich leichtere und kompaktere Variante ist die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form – wie beim Einsatz in Weltraumraketen. Damit Wasserstoff unter normalem Druck flüssig bleibt, muss er allerdings bei extrem niedriger Temperatur in isolierten Tanks aufbewahrt werden. Die Lagerungstemperatur liegt bei atmosphärischem Druck für flüssigen Wasserstoff bei minus 253° C, also nahe dem absoluten Nullpunkt. Das benötigte Speichervolumen ist dabei noch etwa vier Mal so gross wie bei der Verwendung von Kerosin.

In den Jahren 2000 bis 2002 wurde in einem umfangreichen EU-Forschungsprojekt (CRYOPLANE)⁵ unter der Leitung von AIRBUS die Weiterentwicklung von solchen Flüssig-Wasserstoff-Passagierflugzeugen untersucht. Es zeigte sich, dass ein solches Flugzeug bei gleicher Transportleistung kaum schwerer als ein herkömmliches Flugzeug wäre, aber wegen des grösseren Volumens unter Beibehaltung gleicher Transportkapazität vermutlich ca. 10 % mehr Energie benötigen würde. Sowohl die Bereitstellung, die Zwischenspeicherung und der Transport von flüssigem Wasserstoff bei minus 253° C wären mit hohem Energieaufwand verbunden.

Auch 17 Jahre nach dem CRYOPLANE-Projekt stellt die Speicherung des Wasserstoffs für die übliche Grösse und den Reichweitenbedarf von Passagierflugzeugen ein grosses Problem dar. Der Verbrauch von Wasserstoff muss zudem recht zeitnah mit der Produktion geschehen, da bei der Speicherung über längere Zeit recht grosse Wasserstoffverluste auftreten können. Ein Elektroantrieb mittels Wasserstoff und Brennstoffzellen benötigt ebenfalls Batterien. Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs grosser Flugzeuge und des Gewichts von benötigten Pufferbatterien fällt diese Variante bis auf weiteres weg. Gasturbinen sind auf den typischen Reiseflughöhen hingegen sehr viel energieeffizienter als Fahrzeug-Verbrennungsmotoren⁶, deshalb wäre die direkte Verbrennung von Wasserstoff in einer Gasturbine (wie damals bei der TU-155) eine echte Option gegenüber eines Wegs über die Brennstoffzelle. Unklar ist der Gesamteffekt auf das Klima der Wasserstoffvariante, da bei der Wasserstoffverbrennung (ob in einer Brennstoffzelle oder in einer Gasturbine) zirka drei Mal so viel Wasserdampf entsteht, wie bei der Kerosinvariante und verstärkte Wolkenbildung auf grosser Höhe nach heutigem Wissen insgesamt zu mehr Klimaerwärmung führt. Im September 2018 wurde in Europa das Nachfolgeprojekt ENABLEH₂ gestartet⁷, welches technische, ökologische und ökonomische Aspekte weiter untersucht.

⁵ EU Projektnummer GRD1-1999-10014, Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis

⁶ Heutige Gasturbinen setzen im Reiseflug über 50% der Energie des Treibstoffs in Rotationsenergie des Fans (Propeller) um.

⁷ ENABLING cryogenic Hydrogen based CO₂ free air transport, EC grant no 769241, Horizon 2020, <https://www.enableh2.eu/>

Effizientere und sauberere Triebwerke

Kerosinbetriebene Flugzeuge, welche heute und in den kommenden Jahren in Verkehr gesetzt werden, erreichen eine durchschnittliche Einsatzdauer von 30 und mehr Jahren. Selbst wenn die oben geschilderten Probleme bei alternativen Antrieben in den nächsten Jahren behoben würden, dürfte es noch lange dauern, bis sie einen substantiellen Anteil am Luftverkehrsmarkt bilden könnten.

Schaut man sich die Technologie-Projekte der grossen Triebwerkshersteller an, liegt der Schwerpunkt deshalb nach wie vor auf der weiteren Verbesserung der Triebwerke, vorab der weiteren Verbesserung der Treibstoffeffizienz. Das BAZL kam vor mehr als zehn Jahren zum Schluss, dass kerosinbetriebene Gasturbinen in der Luftfahrt für Grossflugzeuge noch sehr lange die dominierende Antriebsart sein werden. Deshalb hat es seine Anstrengungen mit Blick auf die Zukunft verstärkt, diese Motoren durch verschärfte und neue Umweltauforderungen so sauber wie möglich zu machen.

Dank diesem Engagement mit Innovation in der Schweiz und günstigen internationalen Rahmenbedingungen ist es gelungen, neue globale Umweltstandards zu entwickeln und zu verabschieden. Dazu gehört die Reduktion der ultrafeinen Russpartikel aus Flugzeugtriebwerken. Damit wurde eine Lücke bei der Regulation von Emissionen geschlossen, welche sowohl gesundheits- wie klimarelevant sind. Die Entwicklung der neuen Umweltnorm («Feinstaubstandard») hat auch Möglichkeiten eröffnet, ruffreie Triebwerke zu konstruieren. Mit den neuen globalen Umweltnormen versuchen Behörden wie das BAZL, die Hersteller insgesamt in Richtung solcher ultra-sauberer Verbrennungstechnologie zu bewegen.

Um den Treibstoffverbrauch weiter zu senken, steigern die Triebwerkshersteller einerseits den thermodynamischen Wirkungsgrad, indem sie die Verdichtung der Verbrennungsluft noch mehr erhöhen, andererseits erhöhen sie den Propulsionswirkungsgrad, indem sie den Durchmesser des Fans bzw. Propellers möglichst vergrössern⁸. Die Bestrebungen erfordern wegen höheren Arbeitstemperaturen im Kerntriebwerk spezielle Materialien und ausgeklügelte Kühltechniken, welche bei allen Herstellern laufend weiterentwickelt werden. Grössere Fandurchmesser erfordern auch Gewichtskompensation durch weniger Fanblätter und spezielle Leichtbauweisen. Das grösste zivile Flugzeugtriebwerk, das GE9X, welches nächstens auf den Markt kommt, hat noch 16 Fanblätter, verglichen mit den 22 Fanblättern des Vorgängers GE90. Gleichzeitig hat das Gewicht des Fans im Vergleich zum Vorgänger abgenommen und dessen Effizienz zugenommen.

Bei grossen Fandurchmessern passen die Drehzahlen von Turbinenwelle mit den tiefer werdenden Drehzahlen des Fans nicht mehr zusammen, deshalb benötigen Flugzeugtriebwerke mit grossen Fandurchmessern Getriebe. Rolls-Royce arbeitet an einem Grosstriebwerk mit Untersetzungsgetriebe, dem sogenannten Ultrafan, um den Treibstoffverbrauch weiter drastisch zu senken. Wie erläutert wurde, werden Flugzeuge noch für sehr lange Zeit Kerosin benötigen. So sauber eine mit Kerosin betriebene Gasturbine auch verbrennt – sie stösst entsprechend dem Kohlenstoffgehalt des Treibstoffs CO₂ aus. Davon ausgehend muss eine realistische Reduktion von fossilem CO₂ in der Luftfahrt in naher Zukunft neben der Reduktion des Verbrauchs primär darin bestehen, den Kohlenstoff im Kerosin oder einem anderen geeigneten Treibstoff aus nicht fossilen Quellen zu gewinnen und die Prozessenergie für die Herstellung des Treibstoffs mittels Nutzung erneuerbarer Energien bereitzustellen.

Synthetische Treibstoffe fördern

Bereits heute kann Kerosin aus einer beliebigen Kohlenstoffquelle zusammen mit Wasserstoff und entsprechender Prozessenergie synthetisch hergestellt werden. Als Kohlenstoffquelle kommen Biomasse, Abfälle, CO₂-Abgase bzw. CO₂, welches der Luft entzogen wird, in Frage. Die Prozessenergie kann mittels Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen werden («Power to Liquid»). Dabei wird beispielsweise der für die Kerosinherstellung benötigte Wasserstoff mittels Elektrolyse, d.h. aus Wasser und Strom, hergestellt. Eine weitere Möglichkeit

⁸ Es ist zur Erzeugung des Schubs effizienter, mehr Luftmasse etwas langsamer zu bewegen, als eine kleine Luftmasse schneller

besteht darin, Sonnenenergie direkt als gebündelte Wärme für die Gewinnung der Kerosinbausteine aus der Luft zu nutzen («Sun to Liquid»). «Power to Liquid» ist für die Produktion von Kerosin im industriellen Massstab schon weit entwickelt, wogegen «Sun to Liquid» noch in den Anfängen steckt. Hauptproblem sind bislang die hohen Kosten solcher Kerosinproduktionsarten.

SSM 4. August 2020