

TRAGFLÄCHEN ALS BIEGE-/TORSIONSANTRIEB

- EIN BEITRAG ZUM JAHR DER ENERGIE -

W. Send
ANIPROP GbR
Sandersbeek 20, D-37085 Göttingen

Zusammenfassung

Der als Biege-/Torsionsantrieb bezeichnete Mechanismus der Schuberzeugung mit Hilfe der gekoppelten Biegung und Verwindung eines Tragflügels geht physikalisch zurück auf die klassische Lösung des Umströmungsproblems für die Schlag- und Drehbewegung der ebenen Platte. Diese zentrale Antriebsform bei fliegenden und schwimmenden Lebewesen ist unverändert wenig erforscht und derzeit noch weniger eine Option für effiziente Antriebe in der Luftfahrt. Aber Umwelt- und Energieaspekte sind eine neue Herausforderung und sie bieten zugleich Ansätze für einen neuen Anlauf in der Forschung. Das konkrete Ziel eines Hybridantriebs für ein modernes Transportflugzeug mit einem Anteil von 10 % Biege-/Torsionsantrieb an der gesamten Schubkraft im Reiseflug dient als Wegweiser für die Bilanzierung der Wirkungsgrade und derzeitigen technischen Möglichkeiten unter Verwendung von Brennstoffzellen. Auf dem langen Weg zu einem ersten Flugversuch mit Klappenschwingungen ist das Projekt eines bemannten Kleinflugzeugs für zwei Personen ein nahe liegender Meilenstein, der innerhalb weniger Jahre zu erreichen wäre.

1. EINLEITUNG

Der Blick auf das Steigerungspotenzial für den Gesamtwirkungsgrad moderner Triebwerke (Bild 3 auf der nächsten Seite) auf Basis fossiler Brennstoffe offenbart den thermischen Wirkungsgrad als die Bremse, die auch moderne Triebwerkskonzepte nicht zu lockern vermögen. Zudem ist am Flugzeug konzeptionell unvermeidlich, dass der Ort des Wirkens der Schubkraft zusammenfällt mit dem Ort der Erzeugung der zugehörigen Leistung und emittierte Schadstoffe dort nur schwer zu kontrollieren sind. Beide Schranken umgeht der Biege-/Torsionsantrieb, der seit O. Lilienthals ersten und vergeblichen Versuchen (Bild 1) außer von einigen ambitionierten Pionieren nicht mehr als Antriebs-

konzept verfolgt und schon gar nicht systematisch erforscht worden ist. Die Bemühungen von J.D. DeLaurier [1] ragen aus diesen Versuchen heraus, weil sie einmündeten in den ersten Flug eines bemannten Flugzeugs mit Biege-/Torsionsantrieb, der seinerseits von einem Kolbenmotor bewegt wurde (Bild 2). Aus heutiger Sicht haben drei Faktoren das Ausbleiben von Erfolgen begünstigt:

- Eine mangelnde theoretische Durchdringung der komplexen Wechselwirkung zwischen der elastischen Struktur der Flügel und der umgebenden Strömung, deren Erforschung in jüngster Zeit durch die Anforderungen der Luftfahrtindustrie wieder neue Impulse erfahren hat,



BILD 1. Erster Biege-/Torsionsantrieb zur subsidiären Schuberzeugung. Kleiner Schlagflügelapparat von O. Lilienthal 1894.

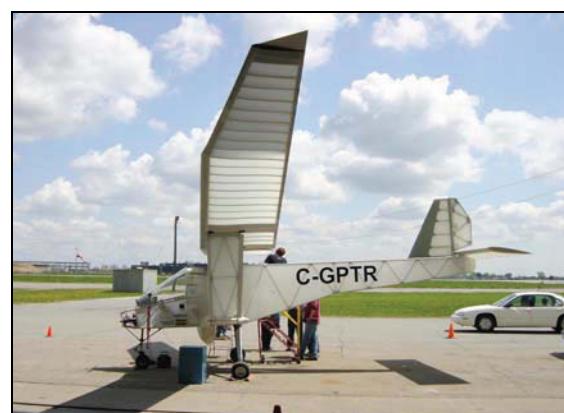


BILD 2. Bemanntes Flugzeug mit Biege-/Torsionsantrieb (J.D. DeLaurier, University of Toronto). Historischer Erstflug am 8. Juli 2006.

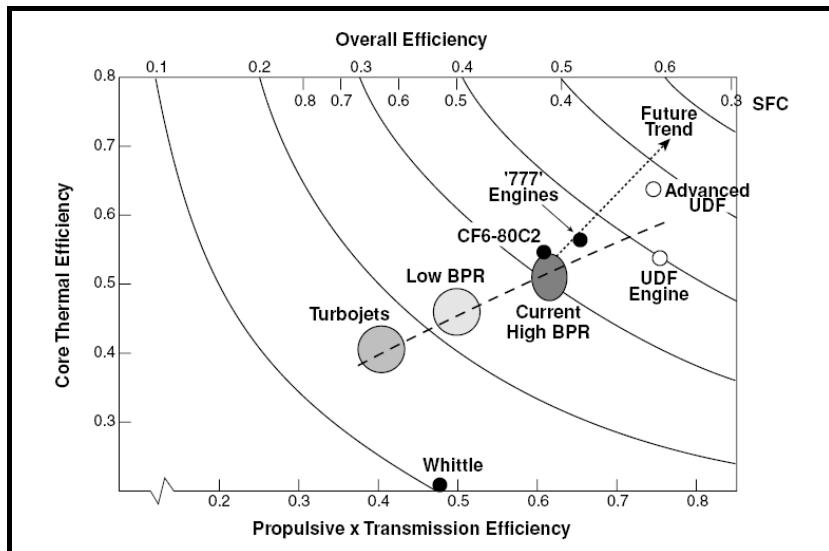


BILD 3. Wirkungsgrade moderner Triebwerke [4]. UDF: Unducted Fan, BPR: Bypass Ratio, SFC: Specific Fuel Consumption.

- das Fehlen von Aktuatoren hoher spezifischer Leistung und zugleich niedriger Arbeitsfrequenz, wie sie bereits für die Robotik entwickelt worden sind,
- und schließlich der Mangel an hochfesten elastischen Werkstoffen für eine hohe Zahl von Lastwechseln, wobei für Flugzeugbauer schwingende Tragflächen stets eine Furcht gewesen sind.

Aber Umwelt- und Energieaspekte sind eine neue Herausforderung. Und gerade sie bieten, mehr noch als klassische aerodynamische Kriterien, Ansätze für einen neuen Anlauf in der Forschung an diesem größten der „Patente der Natur“ bei den fliegenden Lebewesen. Airbus Industries hat den Begriff der „Ökoeffizienz“ eingeführt und als strategisches Ziel erklärt, das auf breiter Front angegangen werden und zu drastischen Einsparungen bei fossilen Brennstoffen und CO₂ Emissionen führen soll. Speziell für die bordeigene Stromversorgung wird an einem Prototyp mit Brennstoffzellen gearbeitet, dessen Stand der Entwicklung beachtlich fortgeschritten ist. M. Zoller hat berichtet, dass 2009 der „Technology Readiness Level 6“ (TRL 6) für dieses Projekt erreicht worden ist [2].

Es bleiben die Fragen nach der Skalierbarkeit, der technischen Umsetzung und dem Nutzen eines Antriebs mit schwingenden Tragflächen angesichts moderner Triebwerke enormer Schubkraft.

Die nachfolgenden Darlegungen gehen zu einem großen Teil zurück auf einen Vortrag, den Autor 2009 an Technischen Universität Darmstadt gehalten hat und der einem beschränkten Leserkreis auch in gedruckter Form bereits zugänglich gemacht worden ist [3].

2. LUFTFAHRTANTRIEBE

Die Verwendung des in der Natur überaus erfolgreichen Mechanismus Schwingenflug zur Erzeugung der Schubkraft beim Fliegen ist als Antrieb für Luftfahrzeuge nahezu vollständig aus dem Blickfeld der Forschung verschwunden. Wenn man in die Geschichte der Luftfahrtforschung zurückblickt, so muss man sogar eingestehen, dass Antrieb durch Schwingenflug nie ein besonders intensiv verfolgtes Forschungsthema gewesen ist, wenn man von einzelnen Initiativen absieht. Seit dem ersten Motorflug der Gebrüder Wright im Jahre 1903 sind nur Propellerantriebe entwickelt worden. Die ab Mitte des letzten Jahrhunderts zunehmend verwendeten Turbinenantriebe stehen in der Tradition des Antriebsprinzips, Schubkraft auf der Basis rotierender Schaufelblätter zu erzeugen, auch wenn der Übergang vom Kolbenmotor zur Gasturbine nicht nur aus technischer Sicht ein bedeutender Fortschritt gewesen ist, sondern auch Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit gesteigert hat.

- Allen Antrieben ist gemeinsam, dass der Ort des Wirkens der Schubkraft identisch ist mit dem Ort ihrer Erzeugung.

Dieser Ort mag unter, in oder über den Tragflächen liegen oder auch im Heckbereich des Flugzeugs angeordnet sein. Es gibt jedoch keinen wie immer gearteten Mechanismus der Kraftübertragung, wie er bei den fliegenden Lebewesen augenfällig ist. Diese haben ihre Flugmuskulatur im Rumpf und die Schubkraft wird durch Hebel und Sehnen übertragen.

Die Einführung der Bezeichnung *Biege-/Torsionsantrieb* für technische Antriebe nach Art des Schwingenflugs, die der Autor erstmals in einer Arbeit [5] mit dem Titel „Subsidäre Schuberzeugung mit gekoppelten Biege- und Torsionsschwingungen in transsonischer Strömung“ angeregt hat, ist nicht nur sprachliche Kosmetik am blassen und mehr auf morphologische Aspekte zielenden Begriff des Schwingenflugs. Die Bezeichnung stellt vor allem die völlig andersartige Funktionsweise der Erzeugung von Schubkraft nach Art der fliegenden Lebewesen erklärend in den Vordergrund. Dazu muss man sich vor Augen halten, dass ein Fluggerät Schubkraft für drei wesentliche Aufgaben benötigt:

- Zur Beschleunigung beim Start bis zum Erreichen der Mindestgeschwindigkeit, bei der der dynamische Auftrieb an den Tragflächen das Fluggerät tragen kann,

- zum Anheben des Fluggeräts auf die gewünschte Flughöhe und
- zur Überwindung des Widerstands der Strömung bei gleichbleibender Flughöhe.

Gerade der erste und entscheidende Punkt der Beschleunigung auf die Startgeschwindigkeit führt dazu, dass die Triebwerke für Fluggeräte nicht mit ihrer Leistung gekennzeichnet werden, sondern durch Angabe der Schubkraft. Auf der Landebahn regieren noch Newtons Gesetz $Kraft = Masse \times Beschleunigung$ und das Weg-Zeit-Gesetz in der Form $Geschwindigkeit = Beschleunigung \times Zeit$. Das Kraftgesetz liefert nicht nur die Beschleunigung zur gegebenen Masse des Flugzeugs und der Schubkraft der Triebwerke. Man erfährt aus den beiden Gesetzmäßigkeiten auch, wie lang der Startweg bis zum Abheben sein muss. Starten und Steigen erfordern die gewaltigen Schubkräfte moderner Triebwerke, während die Überwindung des Strömungswiderstands beim Reiseflug eher moderate Anforderungen stellt im Vergleich zu den beiden erstgenannten Flugphasen. Sowohl mit dem Steigen wie mit dem Reiseflug lassen sich Leistungen verbinden, die physikalisch gegeben sind durch

- $Steigleistung = Gewichtskraft \times Steiggeschwindigkeit$ und
- $Flugleistung = Schubkraft \times Reisegeschwindigkeit$.

3. VORZÜGE DER BIEGE-/TORSIONSANTRIEBE

Wesentliches Merkmal eines Biege-/Torsionsantriebs ist eine periodische Bewegung der Tragfläche mit einer von der Flügelwurzel zur Flügelspitze zunehmenden Biegung der Tragfläche, die überlagert wird von einer in gleichem Maße zunehmenden Torsion. Ob nun die ganze Tragfläche oder nur Teile davon in den Mechanismus einbezogen sind, ist eine Frage des Entwurfs für das Fluggerät. Kleine Flugzeuge könnten ausschließlich mit einem Biege-/Torsionsantrieb auskommen. Für größere Flugzeuge wird der Antrieb aus heutiger Perspektive nur als subsidiäre Schuberzeugung dienen können. Dieses Form ein gemischten Antriebskonzepts ist eingangs auch als „Hybridantrieb“ bezeichnet worden.

Die zeitliche Änderung von negativer zu positiver Biegung und zurück wird bei Lebewesen als Aufschlag (Upstroke) und Abschlag (Downstroke) bezeichnet und geht einher mit einer gleichzeitigen Verwindung von positiven zu negativen Werten des Anstellwinkels, wie dies in Bild 4 für den Querschnitt durch die Tragfläche eines modernen Transportflugzeugs dargestellt ist [6]. Bei positivem Anstellwinkel ist die Flügelnase höher als die Hinterkante und umgekehrt. Die Bewegung führt strömungsmechanisch zur Erzeugung einer Schubkraft sowohl beim Aufschlag wie beim Abschlag, also mit doppelter Periode gegenüber der Bewegung selbst. Im Gegensatz zu konventionellen Triebwerken wird

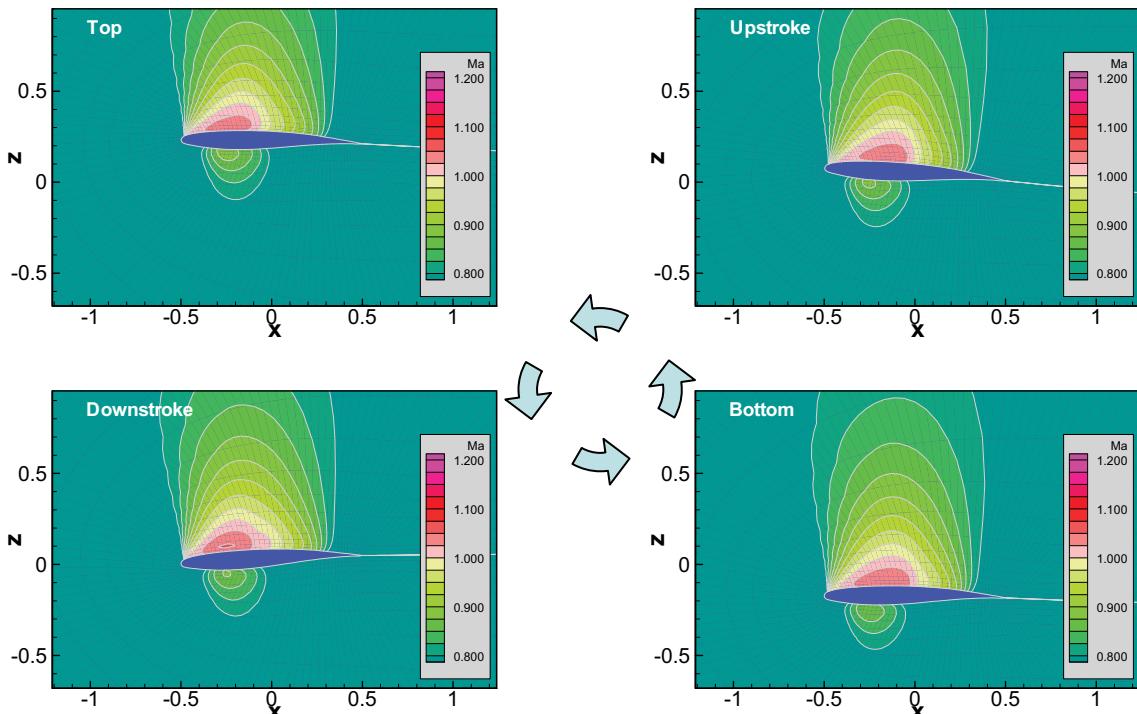


BILD 4. Querschnitt der Tragfläche eines Transportflugzeugs im Reiseflug. Konturlinien der Machzahl. Trotz großer Schlag- und Drehamplitude bleibt das Überschallgebiet auf der Oberseite der Tragfläche nahezu unverändert [6]. Verlauf der Bewegung entgegen dem Urzeigersinn: Top – Downstroke – Bottom – Upstroke. Machzahl $Ma = 0.75$, Schlagamplitude $h_0/c = 0.2$, Drehamplitude $\alpha_0 = 3.3^\circ$.

die Leistung beim Biege-/Torsionsantrieb für die Schubkraft nicht am Ort ihres Wirkens, sondern in einem Generator im Flugzeug aufgebracht. Aktuatoren im Flügel setzen die Leistung um in eine Biege-/Torsionsbewegung.

In diesem letzten Punkt unterscheidet sich der Biege-/Torsionsantrieb auch graduell vom Mechanismus der Schubkrafterzeugung bei den Lebewesen. Lebewesen haben in den Flügeln keine Muskeln. Die Kraft wird aus dem Rumpf durch die Schlagmuskulatur übertragen und erfährt durch Sehnen und mechanische Zwangsbewegungen eine Feinsteuerung. Die aktive Ansteuerung der Flügeltorsion durch Sehnen bewirkt einen von der Größe der Leistung her zwar kleinen, aber hinsichtlich der Beeinflussung des aerodynamischen Wirkungsgrades entscheidenden Beitrag. Die Skizzierung des Mechanismus führt auf die Vorteile, die man vom Biege-/Torsionsantrieb erwarten kann:

- Die Trennung zwischen dem Ort der Erzeugung der Flugleistung und dem Ort des Wirkens als Schubkraft am Flügel eröffnet neue Optionen des Einsatzes alternativer Energiequellen für die Flugleistung.
- Eine gekapselte Energiequelle im Rumpf des Flugzeugs liefert nicht nur die Option der Einflussnahme auf eine wesentliche Lärquelle beim Fliegen, sondern auch auf den Ausstoß von Schadstoffen.
- Alternative Energiequellen bieten die Option der Reduktion der Verwendung von fossilen Brennstoffen beim Fliegen.
- Unter den drei Verwendungsarten der Schubkraft beim Fliegen ist der Reiseflug für den Einsatz eines Biege-/Torsionsantriebs im Sinne einer subsidiären Schuberzeugung das naheliegendste Verwendungsziel.
- Schließlich gibt es strömungsmechanische Aspekte wie den beschleunigten Zerfall der Randwirbel im Landeanflug, die aber nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtung sind.

Unter den alternativen Energiequellen bietet die Brennstoffzelle die meisten Aussichten für eine Verwendung. Der Flugzeughersteller Airbus hat den Begriff Ökoeffizienz für seine Luftfahrzeuge eingeführt und zu einem strategischen Ziel erklärt. Auf dieses Ziel einer Verbesserung der ökologischen Bilanz beim Fliegen zielt die subsidiäre Schuberzeugung mit einem Biege-/Torsionsantrieb.

4. URSACHE DER ENERGIEEFFIZIENZ

Die hohe Energieeffizienz des Biege-/Torsionsantriebs hat ihre Ursache in der Eigenart der physikalischen Abläufe während der Bewegung. Alle wesentlichen Tatsachen sind bekannt seit der Lösung des Umströmungsproblems für die ebene schwingende Platte bei gekoppelter Schlag- und

Drehbewegung bei gleichförmiger Anströmung [7], die um 1936 unabhängig von mehreren Wissenschaftlern gefunden wurde. Diese Kinematik liegt der Fortbewegung durch Flossenschlag oder Schwingenflug zugrunde und sie darf zu Recht als zentraler Mechanismus bei den fliegenden und schwimmenden Lebewesen bezeichnet werden. Dieser Mechanismus ändert sich auch nicht bei hohen Fluggeschwindigkeiten, also in transsonischer Strömung. Dies vermittelt eindrucksvoll die Bildsequenz von der Schuberzeugung mit dem Profil eines modernen Transportflugzeugs in Bild 4.

So lange diese mathematisch-physikalische Erklärung für die Erzeugung der Vortriebskraft bei den fliegenden und schwimmenden Lebewesen bereits als wissenschaftliche Veröffentlichung bekannt ist, so wenig haben ihre Konsequenzen Eingang in die wissenschaftliche Forschung gefunden. Es zählt zu den wirklich bedauerlichen Aspekten der höchst bewundernswerten Arbeiten von J. DeLaurier und dem daraus hervorgegangenen Fluggerät (Bild 2), dass in der Konstruktion des Antriebs die zentralen Aussagen der erwähnten Theorie zur Energieeffizienz dieses Antriebs gar nicht umgesetzt worden sind.

Es zählt zu den Hauptanliegen in den Arbeiten des Verfassers zu dem Thema Biege-/Torsionsantrieb, diese Tatsachen über dessen Energieeffizienz zu verbreiten und um ihre Kenntnisnahme zu werben. Es gibt inzwischen zahlreiche Modelle mit Biege-/Torsionsantrieben, also schwingenden Tragflächen, aber praktisch alle setzen die theoretischen Grundlagen nicht konsequent um und nutzen daher auch nicht die Vorteile dieses Antriebs¹. In Mode gekommen sind solche Modelle in der Folge der Miniaturisierung elektronischer Fernsteuerungen.

In gebotener Kürze sei auch eine quantitative Darstellung der Energieeffizienz gegeben. Folgende Größen haben in einen wesentlichen Einfluss:

- die Fluggeschwindigkeit u_0
- die Frequenz f der Schwingung
- die Amplituden h_0 und α_0 von Schlägen und Drehen
- die Phasenbeziehung κ zwischen Schlägen und Drehen

Der Vereinbarung in den klassischen Publikationen folgend eilt der Schlag der Drehung um $\kappa = 90$ Grad voraus, wenn beim Aufschlag von unten nach oben auch die Drehung größer wird (positiver Anstellwinkel) und beim Durchgang des Schlags durch seine Mittellage die Drehung die größte Auslenkung erfährt. Aus den Grundgrößen leiten sich zwei

¹ Diese Feststellung muss man gleichwohl einschränken. Es gab eine Zeit lang (ab Mitte der 1990er Jahre) ein Sportgerät namens *Trampfoil* zur Fortbewegung auf dem Wasser, dass mit einem Biege-/Torsionsantrieb und Muskelkraft funktioniert (www.trampfoil.com).

dimensionslose Kennzahlen ab, mit denen das Ergebnis des Zusammenwirkens von Schlägen und Drehen übersichtlich dargestellt werden kann:

- die so genannte reduzierte Frequenz

$$(1) \quad \omega^* = \frac{2\pi \cdot f \cdot (\ell_m / 2)}{u_0}$$

- und das Amplitudenverhältnis

$$(2) \quad \lambda = \frac{h_0}{\alpha_0 \cdot \ell_m / 2}$$

In den beiden gegebenen Definitionen tritt eine mittlere Flügeltiefe $\ell_m = A/b$ auf, die sich ableitet aus der Grundrissfläche A der Tragflächen eines Fliegers, geteilt durch die Spannweite b . Das nachfolgende Ergebnis bezieht sich auf den Schnitt durch eine Tragfläche, kann aber zur Abschätzung von Größenordnungen auch streifenweise auf eine ganze Tragfläche angewandt werden. In wenigen Schritten, die mit den Mitteln der schulischen Mathematik zu bewältigen sind [8], gelangt man zu einer vereinfachten Beschreibung der Leistungen P , die im Mittel über eine Schlagperiode an den Freiheitsgraden Schlägen (Index h) und Drehen (Index α) aufgebracht und am Freiheitsgrad Translation (Index g) als Schubleistung gewonnen werden. Dieser Zusammenhang gestattet die Definition des aerodynamischen Wirkungsgrades η des Biege-/Torsionsantriebs:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{erzielte Vorschubleistung}}{\text{aufgebrachte Biege-/Torsionsleistung}}$$

In der formelmäßigen Darstellung

$$(3) \quad \eta = \frac{-\langle P_g \rangle}{\langle P_h \rangle + \langle P_\alpha \rangle} \approx \frac{-\langle P_g \rangle}{\langle P_h \rangle}$$

weist das Minuszeichen vor der mittleren translatorischen Leistung darauf hin, dass nur für den Fall, dass auch Leistung frei wird, der Wirkungsgrad sinnvoll definiert ist. Die spitzen Klammern $\langle X \rangle$ kennzeichnen den Mittelwert der jeweiligen Größe X über eine Periode. Die erwähnte einfache Herleitung liefert noch nicht den sehr kleinen Anteil der Torsion, sondern unterstellt nur das Vorhandensein einer Drehung mit gegebener Amplitude. Die Darstellung verwendet so genannte Leistungsbeiwerte, auf deren Basis die Leistungen selbst sich nach entsprechender Dimensionierung ergeben.

Man erhält

$$(4) \quad \langle P_g \rangle = \langle c_{\Pi,g} \rangle \cdot \alpha_0^2 \cdot \frac{1}{2} \varrho u_0^3 \cdot A$$

sowie

$$(5) \quad \langle P_h \rangle = \langle c_{\Pi,h} \rangle \cdot \alpha_0^2 \cdot \frac{1}{2} \varrho u_0^3 \cdot A$$

und

$$(6) \quad \langle P_\alpha \rangle = \langle c_{\Pi,\alpha} \rangle \cdot \alpha_0^2 \cdot \frac{1}{2} \varrho u_0^3 \cdot A$$

als Zusammenhang zwischen Leistungen und Beiwerten. Für die ersten beiden Beiwerte folgen aus der erwähnten Herleitung die Formeln

$$(7) \quad \langle c_{\Pi,h} \rangle = \pi \cdot \omega^* \cdot \lambda \cdot (\omega^* \cdot \lambda - \sin \kappa)$$

und

$$(8) \quad \langle c_{\Pi,g} \rangle = -\pi \cdot (\omega^* \cdot \lambda \cdot \sin \kappa - 1)$$

Für den einfachen Fall der Phasenlage $\kappa = 90^\circ$ des Schlagens gegenüber dem Drehen reduziert sich das Auftreten des Biege-/Torsionsantriebs auf die einfache Bedingung

$$(9) \quad \omega^* \cdot \lambda > 1, \quad \omega^* \cdot \lambda = \frac{h_0 \cdot \omega}{u_0 \cdot \alpha_0} =: \frac{a_{H0}}{\alpha_0}$$

Der als Abkürzung eingeführte Winkel α_{H0} resultiert aus der bereits diskutierten scheinbaren Drehung der Tragfläche gegenüber der Anströmung bei der Hubbewegung. Dieser Winkel muss größer sein als der geometrische Winkel bei der Drehbewegung. Stellt man die beiden, nur aus der Kinematik gewonnenen, Beiwerte für eine typische reduzierte Frequenz von $\omega^* = 0.15$ grafisch dar, so erkennt man wesentliche Merkmale dieser Antriebsart:

Es gibt einen schmalen Bereich mit sehr hohem Wirkungsgrad von 80 % und mehr. In diesem Bereich wird allerdings nicht nur, bei konstanter Drehamplitude, immer weniger Leistung für das Schlagen verlangt, auch die Vortriebsleistung nimmt ab. Für einen hohen Wirkungsgrad muss ein Lebewesen oder ein Flugzeug deshalb zunehmend strömungsgünstiger ausgelegt sein, denn nur ein geringer Widerstand gestattet das Erfliegen solcher Bereiche. Man erkennt auch deutlich den kritischen Bereich der durchgezogenen dicken Konturlinie zum Wert null ($\omega^* \cdot \lambda = 1$), bei dem der Mechanismus umschlägt in die Leistungsentnahme.

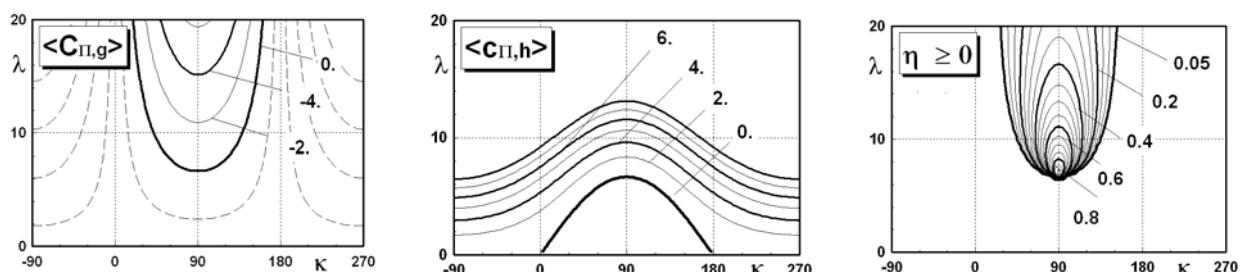


BILD 5. Mittlere Leistungsbeiwerte in vereinfachter Darstellung nach Gleichungen (3), (7) und (8).

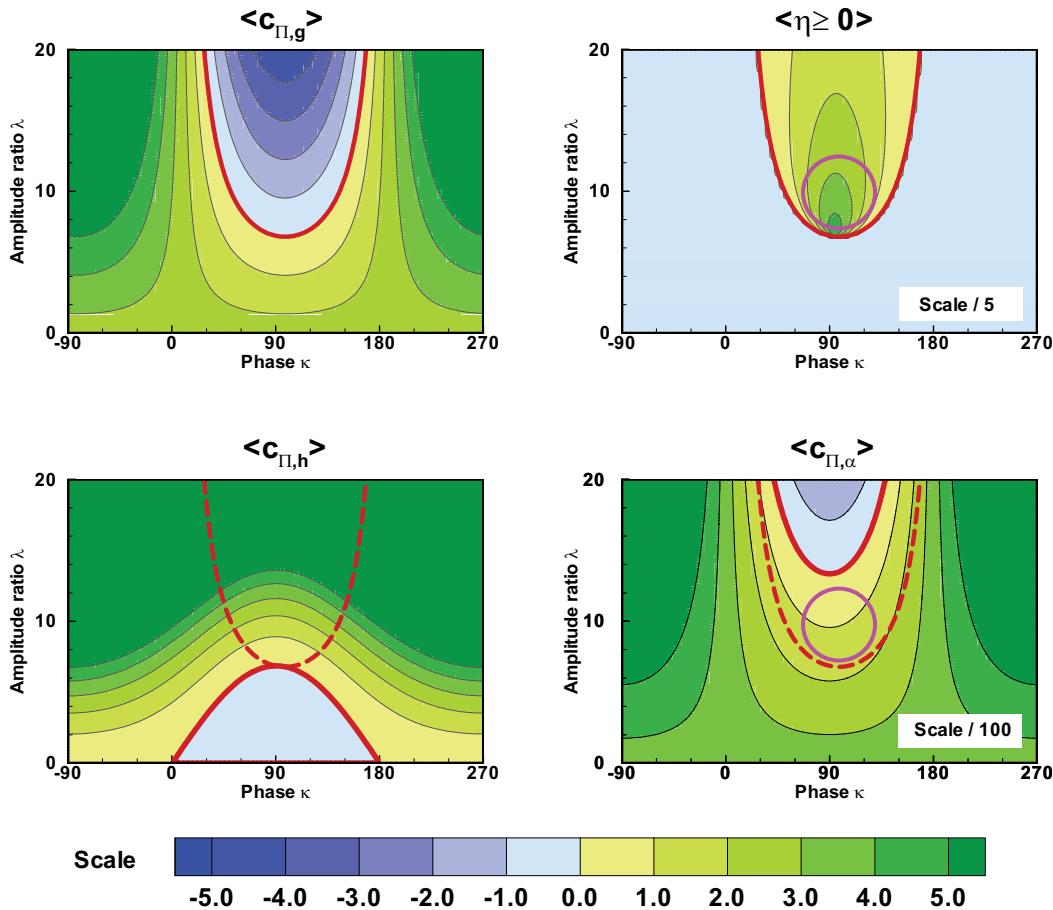


BILD 6. Leistungsbeiwerte der schwingenden Platte für $\omega^* = 0.15$ in genauerer Darstellung. Die „aktive Torsion“ mit hohem Wirkungsgrad ist mit einem violetten Kreis gekennzeichnet.

Bild 6 wiederholt die Darstellung der Leistungsbeiwerte mit den Resultaten einer genaueren Theorie nach Küssner [7], bei der nicht nur die reine Kinematik des Flügels, sondern auch die Strömung hinter der schwingenden Platte Einfluss auf das Ergebnis hat. In den blauen Bereichen wird Leistung entnommen, in den grünen Bereichen Leistung aufgebracht. Nunmehr ergeben sich auch Werte für den Leistungsbeiwert $\langle c_{II,\alpha} \rangle$ der Drehung. Das Ergebnis offenbart eine zentrale Einsicht:

- Der hohe Wirkungsgrad des Biege-/Torsionsantriebs lässt sich nur erzielen, wenn die Torsion mit einer geringen Leistung aktiv angesteuert wird:

$$\langle c_{II,\alpha} \rangle > 0.$$

Auch Rechnungen für den transsonischen Flugbereich moderner Transportflugzeuge zeigen dieses gleiche Resultat. Obwohl diese Einsicht auf mehr als 70 Jahre zurückliegenden Erkenntnissen beruht und für Zoologen aus ihren Beobachtungen längst selbstverständlich ist, so sind doch viele Aerodynamiker unverändert davon überzeugt, dass allein die Flügelbiegung schon ausreicht für einen Schwingenflugantrieb nach Art der Vögel.

5. SUBSIDIÄRE SCHUBERZEUGUNG

Die überschlägigen Betrachtungen in diesem Kapitel geben Antwort auf die Frage, ob

- 10 % der Flugleistung

eines modernen Transportflugzeugs im Reiseflug mit einem Biege-/Torsionsantrieb abgedeckt werden könnten, der seine Leistung von Brennstoffzellen bezieht. Den Abschätzungen liegen die Eckdaten des Airbus A340 zugrunde. Sowohl die genannten 10 % wie die Auswahl des Flugzeugs sind von einer gewissen Willkür. Es geht nur um die grundsätzliche Frage der Machbarkeit. Es ist auch nicht ganz einfach, die verschiedenen Angaben in der Literatur in einen stimmigen Zusammenhang zu bringen.

Im Reiseflug bei der Machzahl $Ma = 0.8$ auf der Flughöhe $H = 10,600$ m (35,000 ft) beträgt die Geschwindigkeit über Grund $u_0 = 240$ m/s = 860 km/h. Während jedes der vier Triebwerke des Airbus A340 vom Typ CFM56-5C am Boden die Schubkraft $T_1 = 140$ kN hat, reduziert sich dieser Wert in der Höhe H auf $T_2 = 34$ kN [9]. Bei einer angenommenen Masse von 240 t ($F_G = 2,400$ kN) ergibt sich mit der unterstellten Gleitzahl 20 (def. als Auftrieb zu Widerstand) daraus der Leistungsbedarf

$P_H = 28$ MW. Nach dieser Zahl entfällt bei vier Triebwerken auf jedes Triebwerk die Schubkraft $F_T = 29.5$ kN. Das ist die Schubkraft bei einem typischen Reiseflug. Pro Flugstunde beträgt der Energiebedarf $E_H = P_H \times 3,600$ s, also 28 MWh oder 102 GJ (Gigajoule). Mit dem Heizwert von Kerosin ist diese Energiemenge äquivalent zu einer Menge von 2.4 t/h, die aber wegen der thermischen, mechanischen und strömungsmechanischen Verluste nicht vollständig in Schubleistung umgewandelt werden kann.

Das Trainingsprogramm VACBI (*Video and computer based instructions*) von Airbus [10] gibt in einem Standardfall für den Treibstoffverbrauch im Reiseflug ungefähr 6.4 t

Kerosin pro Stunde an. Auch andere Literaturstellen geben die gleiche Größenordnung an. Aus diesen beiden Angaben folgt der Gesamtwirkungsgrad η_{TOT} des Flugzeugantriebs für das vorliegende Beispiel

$$\eta_{TOT} = (2.4 \text{ t/h}) / (6.4 \text{ t/h}) \times 100 = 37 \text{ %}.$$

Bild 3 mit der Grafik *Overall Efficiency* entnimmt man, dass die grobe Abschätzung des Gesamtwirkungsgrades in den Bereich der Triebwerke des Flugzeugs Boeing 777 führt, der ebenfalls bei etwa 37 % liegt.

Die Grafik zeigt die in absehbarer Zeit erreichbaren Wirkungsgrade, die selbst für ambitionierte Triebwerkskonzepte noch weit unter 50 % bleiben. Dieser Wirkungsgrad ließe sich mit einem Biege-/Torsionsantrieb unter Verwendung von Brennstoffzellen schon in naher Zukunft erreichen. Der Wirkungsgrad von PEM Brennstoffzellen (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) beträgt

- in heute verwendeten Zellen $\eta_{FUEL} = 50 \text{ %}$ und
- in naher Zukunft gilt $\eta_{FUEL} = 70 \text{ %}$ laut Zoller [2] als machbar.

Diese Angabe bezieht sich auf den Gesamtwirkungsgrad als Verhältnis von gewonnener elektrischer zu eingesetzter chemischer Energie. Geht man für den Biege-/Torsionsantrieb ebenfalls von einem moderaten aerodynamischen Wirkungsgrad η_{AERO} von 70 % aus für eine schwingende Teilfläche der Tragflächen, wobei η_{AERO} dem η in Gleichung (3) entspricht, so lautet ein zu Triebwerken vergleichbarer Gesamtwirkungsgrad

$$(10) \quad \eta_{TOT} = \eta_{FUEL} \cdot \eta_{MECH} \cdot \eta_{AERO}$$

mit η_{MECH} als mechanischem Wirkungsgrad für die Umsetzung der elektrischen Energie in eine mechanische Biegebewegung. Unterstellt man hierfür 90 %, dann ergibt sich der mit zukünftigen Triebwerkskonzepten vergleichbare Wirkungsgrad

F_T Schubkraft der Triebwerke
F_L Auftriebskraft der Tragflächen
F_D Strömungswiderstand
F_G Gewicht des Flugzeugs
F_L / F_D Gleitzahl des Flugzeugs
u_0 Geschwindigkeit über Grund
P_H Leistungsbedarf im Flug
$P_H = F_D \cdot u_0$
$q_H = 43 \text{ GJ/t}$ Heizwert Kerosin
$F_L / F_D \approx 20$ für Airbus A340
TABELLE 1. Bezeichnungen und Daten in Kapitel 5.

$$\eta_{TOT} = 0.7 \cdot 0.9 \cdot 0.7 \Rightarrow 44 \text{ %.}$$

Selbst mit konservativeren Zahlen würden die 35-40 % Gesamtwirkungsgrad heutiger Flugzeuge nominell erreicht werden und man hätte den Vorzug einer höheren Ökoeffizienz. Solche Zahlen gilt es eben noch genau zu erforschen.

Der elektromechanische Wirkungsgrad η_{MECH} von 90 % unterstellt leistungsfähige Aktuatoren, für die es aktuell nur in kleinem Maßstab mechanische Lösungen gibt.

Im Hinblick auf das Ziel der Darlegungen, den Mechanismus und die Effizienz des Biege-/Torsionsantriebs vorzustellen, können die Zahlenangaben jedoch schon ein erster Anhaltspunkt sein.

6. BRENNSTOFFZELLEN FÜR 10 % FLUGLEISTUNG

Eine Energieversorgung mit modernen PEM Brennstoffzellen besteht aus einem Stapel von Zellen und benötigt auch zusätzliche Technik zum Betrieb (Abb. 6). Die Brennstoffzelle des Fahrzeugs *Honda FCX Clarity* leistet 100 kW bei einem Gewicht von 75 kg [2,11]. Die

- Leistung pro kg Gewicht = 1.33 kW/kg

zählt zu den besten derzeit kommerziell verfügbaren Entwicklungen. Diese Zahl ist zu vergleichen mit dem Leistungsgewicht des Triebwerks CFM56-5C. Das Triebwerk wiegt nach den Angaben des Herstellers „trocken“ 3,990 kg. Zu dem ermittelten Verbrauch an Treibstoff von 1.6 t/h gehört die Leistung im Flug von 28 MW/4 = 7 MW. Mit diesen Annahmen beträgt die

- Leistung pro kg Gewicht = 1.75 kW/kg.

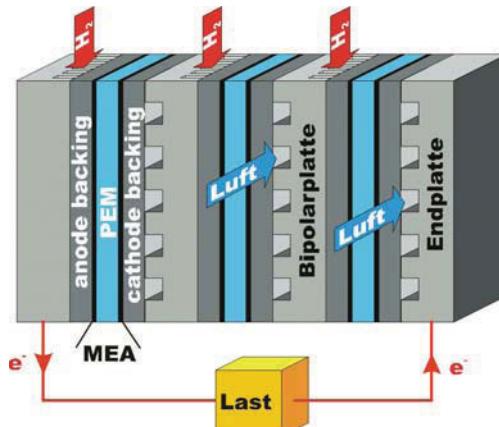


BILD 7. Aufbau von Brennstoffzellen.

Quelle: www.pemfc.de

PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell

MEA: Membrane Electrode Assembly.

Ein modernes Triebwerk ist danach bedeutend effektiver als eine heutige Brennstoffzelle. Der Vergleich wird noch ungünstiger für die Brennstoffzelle, wenn man das Gewicht der Aktuatoren hinzuzählt, welche die abgegebene Leistung erst noch im Flügel umsetzen müssen. Ein Triebwerk ist Energieerzeuger und Antrieb zugleich. Angesichts des Fehlens von Techniken für Aktuatoren wird es dann schwierig, überhaupt noch Abschätzungen zu machen. Ein denkbarer Ansatz für ein Transportflugzeug ist, die vorhandenen Klappensysteme so fortzuentwickeln, dass sie auch als Aktuatoren dienen. Dann ergibt sich kein zusätzliches Gewicht.

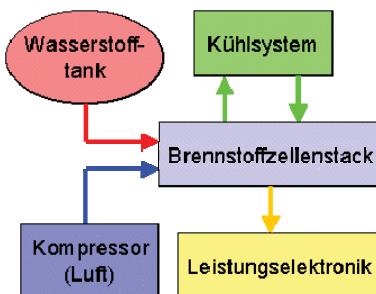


BILD 8. Betrieb von Brennstoffzellen.

Quelle: www.pemfc.de

Möchte man 10 % der 28 MW Flugleistung durch Brennstoffzellen aufbringen, so wären dies 2.8 MW oder 28 Aggregate von 100 kW. Als Gewicht ergäbe sich 2,100 kg. Vom Gewicht her stellen Brennstoffzellen für eine solche Leistung kein grundsätzliches Problem dar.

Als Treibstoff benötigt eine Brennstoffzelle Wasserstoff und Luft; Wasser wird freigesetzt. Die nachfolgenden Angaben beziehen sich auf 10 kW Leistung und gelten für leistungsfähige moderne Aggregate:

Technik	H ₂ [g/s]	Luft [g/s]	Wasser [g/s]
Standard	0.19	11.83	1.56
Aktuell	0.17	10.54	1.39
Zukunft	0.12	7.38	0.97

Für 2.8 MW Leistung sind die aktuellen Zahlen mit 280×3.6 multipliziert, um die Menge in kg/h zu erhalten:

Wasserstoff	171	kg/h
Luft	10,624	kg/h
Wasser	1,401	kg/h

Das Wasser hat Trinkwasserqualität (Zoller, 2009) und kann an Bord eines Flugzeugs für Luftfeuchtigkeit und Servicezwecke verwendet werden.

Die Forschung bei Brennstoffzellen ist in einer stürmischen Entwicklung begriffen, so dass Zahlen einige Zeit nach Erscheinen des Artikels schon mit Vorbehalt gesehen werden müssen.

7. LEISTUNGSDATEN FÜR 10 % ANTRIEB

Die geometrischen Abmessungen eines Biege-/Torsionsantriebs sind von der Größe, dass bereits erweiterte Klappensysteme die Leistung von 2.8 MW aufbringen können. Dies soll durch eine Prinziprechnung nachgewiesen werden, die auf den einfachen Formeln aus Kapitel 4 beruht. Die verwendeten Zahlen sind gegenüber einer Nachrechnung mit einem Rechenprogramm für die Umströmung von Tragflächen im Bereich des Reiseflügs für ein modernes Transportflugzeug ungünstiger. Die Gründe dafür sollen hier nicht im Einzelnen diskutiert werden. Nicht berücksichtigte Kompressibilität ist dabei nur ein Grund. Entscheidend bei den Zahlen ist allein die Größenordnung und die Möglichkeit, auf einer einfachen und nachvollziehbaren Grundlage solche Angaben ermitteln zu können.

Größe	Symbol	Dim.	Wert
Spannweite ohne Winglets	<i>s</i>	m	58
Grundrissfläche Flügel	<i>A</i>	m ²	362
Anteil A/5 für aktive Flächen	<i>f_A</i>	[-]	0.2
Flügeltiefe der Klappe	<i>l_K</i>	m	3
Spannweite einzelne Klappe	<i>s_K</i>	m	12.07
Schlagfrequenz	<i>f</i>	Hz	3
Flughöhe	<i>H</i>	m	10600
Schallgeschwindigkeit	<i>c_S</i>	m/s	300
Dichte	<i>ρ</i>	kg/m ³	0.38
Machzahl	<i>Ma</i>	[-]	0.8
Fluggeschwindigkeit	<i>u₀</i>	m/s	240
Reduzierte Frequenz	<i>ω*</i>	[-]	0.12
Drehamplitude	<i>α₀</i>	deg	6.50
~ in Radian		[-]	0.11
Schlagamplitude	<i>h₀</i>	m	2.00
~ relativ zur Flügeltiefe	<i>h₀ / l_K</i>	[-]	0.67
Amplitudenverhältnis	<i>λ</i>	[-]	11.53
Winkelverhältnis	<i>α_{H0} / α₀</i>	[-]	1.38
Vertikalgeschwindigkeit	<i>2πf · h₀</i>	m/s	37.70
Phasenlage	<i>κ</i>	deg	90
~ in Radian		[-]	1.57
Beiwert Translation	<i>< c_{II,g} ></i>	[-]	-1.21
Beiwert Schlagen	<i>< c_{II,h} ></i>	[-]	1.67
Wirkungsgrad	<i>η</i>		0.72
Nennleistung <i>P₀</i>	<i>f_A · ½ ω u₀³ · A</i>	MW	192
Schubkraft: beide Klappen	<i>< F_g ></i>	kN	-12.42
Leistung: ~	<i>< P_g ></i>	MW	-2.98

TABELLE 2. Exempel für 10 % Antriebsleistung.

Zusammenfassend kann man als Ergebnis der Überlegungen formulieren:

- Aus physikalisch-technischer Sicht gibt es keine prinzipiellen Hindernisse, das Ziel einer hybriden Schuberzeugung mit Biege-/Torsionsantrieb zu realisieren.
- Schwingende Tragflächen müssen nicht nur der „Feind“ des Flugzeugbauers sein.

8. ANSÄTZE FÜR DIE FORSCHUNG

Geht man von den Forschungsansätzen in der Luftfahrt aus, so ergeben sich derzeit einige interessante Möglichkeiten, die Erforschung des Biege-/Torsionsantriebs einzubinden.

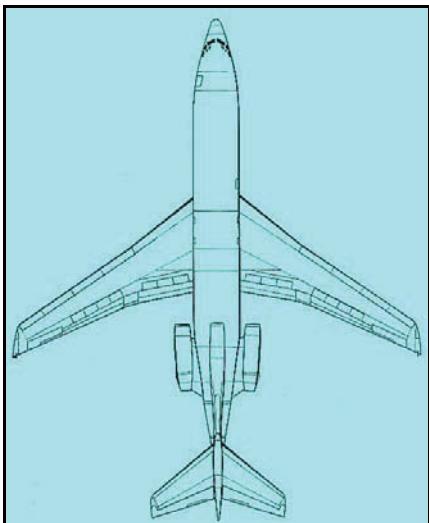


BILD 10. Grundriss der Boeing 727, „clean wing“.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat für seine aktuellen Forschungsziele im Bereich Luftfahrt Forschungsprojekte anvisiert, die motiviert sind durch moderne Antriebskonzepte mit Propfans und durch strömungsmechanische Untersuchungen zum Laminarflügel. Die den Zielen zugrunde liegenden Flugzeugentwürfe kehren zurück zum „clean wing“, also einem Flugzeug ohne Triebwerke an den Tragflächen. Ein solches Antriebskonzept lässt sich in idealer Weise mit einem Biege-/Torsionsantrieb verbinden.

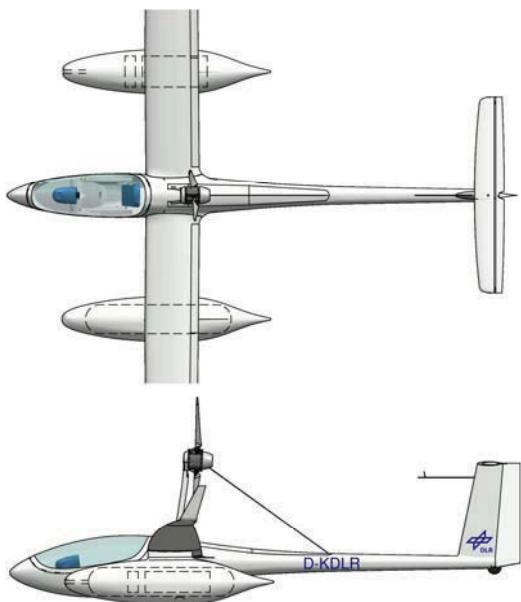


BILD 9. Grundriss der Antares DLR-H2
Quelle: www.dlr.de (Stichwort Antares).

Eine andere Entwicklung zielt auf den Einsatz von Energie aus Brennstoffzellen. Der Motorsegler *Antares 20E* der Firma Lange Flugzeugbau hat einen einklappbaren Propellerantrieb mit Elektromotor, der aus sehr leistungsfähigen Akkumulatoren gespeist wird. In einer Gemeinschaftsentwicklung von Hersteller und DLR ist das Flugzeug mit einer Spannungsversorgung durch Brennstoffzellen umgerüstet worden. Bild 9 zeigt den Grundriss mit den beiden zusätzlichen Gondeln. In der Gondel unter dem rechten Flügel befindet sich der Tank, in der unter dem linken Flügel die Brennstoffzelle. Das Flugzeug mit einer Spannweite von 20 m ist ein idealer Ansatzpunkt für die Erforschung der Option eines Biege-/Torsionsantriebs.

8. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Otto Lilienthal schrieb 1889 im Schlusswort zu seinem legendären Buch *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst*:

Wir müssen daher den Schluß ziehen, daß die genaue Nachahmung des Vogelflugs in Bezug auf die aerodynamischen Vorgänge einzig und allein für einen rationellen Flug des Menschen verwendet werden kann, weil dieses höchst wahrscheinlich die einzige Methode ist, welche ein freies, schnelles und zugleich wenig Kraft erfordernches Fliegen gestattet.

Lilienthals Vision ist, wie wir alle wissen, nicht in Erfüllung gegangen, sondern der Motorflug hat seinen Siegeszug angetreten. Aber man kann aus der Geschichte der Luftfahrt gleichwohl Lehren ziehen:

- Man weiß zu Anfang nie, was aus einer Idee entsteht.
- Man muss erst einmal anfangen, damit überhaupt Erkenntnis wächst.
- Niemand von uns hat die Vorstellungskraft, die Kenntnisse, Materialien und Fertigkeiten vorherzusagen, über die wir in 50 oder 100 Jahren verfügen werden.

In diesem Sinne ist auch die Möglichkeit zu bewerten, dass Lilienthals Vision vom Schwingenflug als Antrieb für Luftfahrzeuge in der Zukunft einmal Einzug in die Realität hält. Ökoeffizienz und Wirkungsgrade, die vom Prinzip her bestechend sind, sollten Anlass genug sein für einen neuen Anlauf in der Forschung.

Die Raumfahrt, die mutigere und ambitioniertere Schwester der Luftfahrt, entwirft Konzepte für die Besiedlung des Mondes und den Flug zum Mars. Forschungsprojekte für die technische Nutzung eines längst bekannten Antriebskonzeptes aus der Natur sind doch immer noch vergleichsweise bodenständige Ziele.

LITERATUR UND QUELLEN

- [1] J.D. DELAURIER, *The Development and Testing of a Full-Scale Piloted Ornithopter*, Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 45, No. 2 (1999), 72-82.
- [2] M. ZOLLER, *Brennstoffzellen als Strategie zu Öko-Effizienz in der Luftfahrt*, Vortrag am 30. April 2009, Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Berlin.
(Zum Zeitpunkt des Vortrags in der Funktion als Manager Technology Platform Multifunctional Fuel Cell Application - Airbus Hamburg)
- [3] W. SEND, *Tragflächen als Biege-/Torsionsantrieb - Können wir von der Natur noch lernen?*, Kolloquium Luftverkehr an der Technischen Universität Darmstadt, Band 16, Hrsg. Arbeitskreis Luftverkehr der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 2009. ISBN 978-3-931385-18-7.
- [4] Z. S. SPAKOVSKY, *Lecture Thermodynamics and Propulsion* (2008), M.I.T. (Cambridge MA).
- [5] W. SEND, *Subsidiäre Schuberzeugung mit gekoppelten Biege- und Torsionsschwingungen in transsonischer Strömung*, DGLR Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress 1999, Berlin, DGLR-JT99-086.
- [6] W. SEND, *Flapping-Wing Thrust in Compressible Flow*. 25th ICAS Congress, Hamburg, Germany, 3-6 September 2006, Paper ICAS2006-3.10.4.
- [7] H.G. KÜSSNER, *Zusammenfassender Bericht über den instationären Auftrieb von Flügeln*, Luftfahrtforschung 13 (1936), 410-424.
- [8] W. SEND, *Der Mechanismus des Schwingenflugs*, Jahrestagung der Deutschen Phys. Ges. Jena 1996. www.aniprop.de/dpg96_vortrag_send.pdf
- [9] SNECMA (INTERNET), www.sneecma.com/IMG/pdf/CFM56-5C_Anglais-2.pdf
- [10] AIRMEDIA, LUFTHANSA, AIRBUS INDUSTRIES. *Airbus A340*, Flug Revue Interaktiv, Köln , Multimedia CD-ROM, 1994.
- [11] HONDA (INTERNET), <http://world.honda.com/FCXClarity/specifications/index.html> (2009).