

Der Traum vom Fliegen – Wie realistisch ist der Schwingenflug mit menschlicher Muskelkraft?

Neuronale Netze – Schnelles Lernen mit Neuro-Fuzzy

Mit Pflanzenölkochern den

Regenwald schützen – Eine innovative Entwicklung lässt hoffen

Rundschau

CP-Verletzung und die Entstehung der Materie · Die Flachbildschirme der Zukunft · Adhäsiva im Tierreich · Mikrobielle Riffbildung im Schwarzen Meer · Überwachung und Repressalien bei Hautflüglern · Duplikationen im Genom

Stressbedingte Variabilität von Phänotypen
Spinnennetz-Effekt gegen Vogelschlag
Gefährdung der Artenvielfalt im Korallenriff · Bär, Wolf und Luchs in Europa
Virusübertragung durch Stechfliegen
Neandertaler-Baby gefunden · Genetische Grundlagen der Sprachentwicklung

Buchbesprechungen

Personalia

Service Tipps und Hinweise
Nachrichten aus dem Internet
Stichwort: ICSI

GEOMAX –

Reisen in der Zeitmaschine –
Womit Demografen in Zukunft rechnen

2

Februar 2003
56. Jahrgang
€ 9,-
E 9981

Naturwissenschaftliche Rundschau

NR

656



Der Traum vom Fliegen

Wie realistisch ist der Schwingenflug mit menschlicher Muskelkraft?

Für das Fliegen ist der Mensch nicht geschaffen worden. Weit liegen seine Möglichkeiten abseits der Kennlinien, die kleinste Lebewesen und große Flugzeuge als flugtauglich ausweisen. Was aber mit ultraleichten Flugzeugen und Propellerantrieb bereits gelungen ist, sollte mit Schwingenflug nach Art der Vögel nicht unmöglich sein. Der Artikel geht der Frage nach, wie die Lebewesen ihre Schubkraft erzeugen und welche Erkenntnisse umgesetzt werden müssten, um einen neuen Leistungssport aus der Taufe zu heben: „Power Flapping“. Aber erst müssen die Aerodynamiker noch ein paar Hausaufgaben erledigen.

Auf einer Anhöhe bei Fiesole oberhalb von Florenz erinnert ein Gedenkstein an Leonardo da Vinci (1452–1519), der dort am Rande eines Steinbruchs Flugexperimente gemacht haben soll (Abb. 1). Seine Studien zum Vogelflug sind berühmt, seine Modelle zum Menschenflug mit Muskelkraft sind nachgebildet worden. Es gibt jedoch keine Zeugnisse, dass er je praktische Flugversuche gemacht hat. Seine lebensgroßen Fluggeräte würden nicht fliegen können, da die Mechanik die erforderlichen Leistungen nicht auf die Tragflächen übertragen könnte. Aber Leonardo hat in uns den Traum wachgehalten, als Menschen mit Muskelkraft und Schwingen die Lüfte erobern zu können.

Rückblick und Einführung

Viele Wagemutige haben nach Leonardo versucht, mit bemerkenswerten oder auch abenteuerlichen Konstruktionen der Natur die Fähigkeit zum Schwingenflug abzujagen. Eines eigenen Artikels bedürfte es, die Geschichte der Versuche und Bemühungen aufzuzeichnen. An dieser Stelle sollen hingegen die Grundlagen und Erkenntnisse zusammengetragen werden, die ein Verständnis des Schwingenflugs ermöglichen, um der Frage nachzugehen, ob er sich vom Menschen realisieren ließe. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den physikalischen und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen des Fliegens einerseits und den in der Natur realisierten spezifischen Flugtechniken, die im Verlauf der Evolution entstanden sind.

Die Grundlagen des Schwingenflugs sind heute sehr genau verstanden und können mit „künstlichen Vögeln“ demonstriert werden. Der Natur auch ihre Listen und Kniffe zu entreißen, wird mit immer raffinierteren Methoden der experimentellen Biologie versucht. Wer gesehen hat, wie schwerfällig sich noch laufende Automaten und künstliche Krabbeltiere bewegen, wird jedoch die Probleme eines autonom fliegenden Schwingenfliegers (engl. Ornithopter) in Menschengröße zu hoch einschätzen.

Bei der Konstruktion ist an Dimensionen zu denken, die von dem kreidezeitlichen Flugsaurier *Quetzalcoatlus northropi* erreicht wurden. Dieser hatte eine Flügelspannweite von 11 bis 12 m und wog schätzungsweise um 80 kg.

Das Fliegen mit Start und Landung, die Flugsteuerung und das Verhalten der umgebenden Umströmung ganz allgemein werden weitgehend verstanden und beherrscht, wie die zahlreichen Fluggeräte verschiedener Größe und Konstruktion vom großen Jumbo-Jet über Paragliders bis zu ferngesteuerten Flugmodellen mit Schwingenflugantrieb zeigen. Abgesehen von der nicht ganz leichten mechanischen Realisierung geht es eigentlich nur um die Frage, ob sich der Mensch überhaupt mit eigenen Kräften in die Luft schwingen kann oder nicht.

Drei Namen ragen aus der wissenschaftlichen Landschaft heraus, die entscheidende Grundlagen zum Verständnis des Schwingenflugs legten:

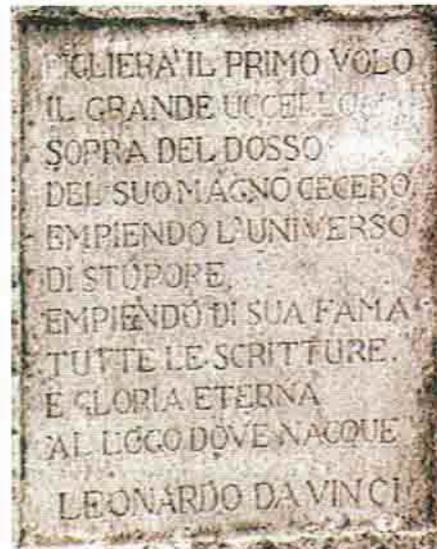


Abb. 1. Die Inschrift mit einem Text von Leonardo da Vinci [1] spricht nur eine Hoffnung aus: „Er wird seinen Flug aufnehmen, der große Vogel ... Und er wird das Universum mit Erstaunen erfüllen, alle Schriften mit seinem Ruhm ...“. (Photo Wolfgang Send)

- Der französische Wissenschaftler Étienne-Jules Marey (1830–1904) hat den Schwingenflug an lebenden Vögeln untersucht und die ersten Aufzeichnungen von den Bewegungen der Flügel überliefert. Marey gilt heute als Pionier der Kinematographie, aber sein Werk *Le Vol des Oiseaux* (Paris 1890) verdiente es, übersetzt und aus der Versenkung gehoben zu werden.
- Otto Lilienthal (1848–1896; Abb. 2) gebührt das Verdienst, die ersten systematischen Gleitflüge in der Menschheitsgeschichte gemacht zu haben. Sein Buch *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst* (Berlin 1889) fasst die Ergebnisse von 20 Jahren Beobachtung des Vogelflugs zusammen. Seine Untersuchungen zum Auftrieb deckten auf, dass Vögel offenbar gar nicht diese Kraftmaschinen sein müssen, für die man sie zu seiner Zeit hielt.
- Die ersten frei fliegenden Schwingenflugmodelle baute der Zoologe Erich von Holst (1908–1962), der am Zoologischen Institut der Universität Göttingen um 1940 im Windkanal genaue Untersuchungen zu den Vortriebskräften an Modellflügeln [2] durchgeführt und den Insektenflug in Zeitlupe filmisch dokumentiert hat. Zusammen mit Dietrich Küchemann von der Aerodynamischen Versuchsanstalt in Göttingen entstanden die ersten Flugmodelle mit Schwingenflugantrieb und zahlreiche Messungen und Rechnungen.

Zum Ausgang des 19. Jahrhunderts waren die Bewegungen beim Schwingenflug qualitativ bekannt, aber aerodynamisch nicht zu deuten. Die Theorie zur Aerodynamik einer gleichförmig bewegten Tragfläche wurde erst um die Jahrhundertwende und in den Folgejahren entwickelt. Schließlich gab es 1922 eine erste mathematische Begründung der Schubzeugung im Rahmen einer Promotion bei dem Strömungsmechaniker Ludwig Prandtl (1875–1953) in Göttingen. Gesucht wurde damals aber etwas ganz anderes: Die unerklärlichen Schwingungen an den Tragflächen, die bei größeren Fluggeschwindigkeiten auftraten, führten zu häufigen Flugunfällen und zermürbten die junge Luftfahrtindustrie. Die Dissertation *Das ebene Problem des schlagenden Flügels* des jungen Wissenschaftlers Walter Birnbaum war die Geburtsstunde eines Forschungsgebiets, das dem Institut, an dem der Autor arbeitet, seinen Namen gibt: Institut für Aeroelastik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Das Stabilitätsproblem oberhalb einer gewissen Grenzgeschwindigkeit, das sich hinter diesen gefährlichen Schwingungen verbirgt, ist bis heute von zentraler Bedeutung bei der Entwicklung eines jeden neuen Flugzeugs.

Die Disziplinen Aerodynamik und Elastomechanik sind die Namensgeber der Aeroelastik und charakterisieren zugleich auch die zentralen Fragestellungen des Schwingenflugs: Die Muskeln treiben die Tragflächen an, die sich gegen die umgebende Luft bewegen. Die Bewegung erfolgt in der Weise, dass die Luft im Mittel nach hinten beschleunigt wird und somit als Reaktion eine Schubkraft am Flügel entfaltet. Starke Kräfte wirken folglich auf die Struktur der Tragfläche zurück, die sich unter dieser Last elastisch verformt. Die Fragen lauten:



Abb. 2. Otto Lilienthal 1894 mit dem kleinen Schlagflügelapparat. Die beweglichen Tragflächenenden sollen eine zusätzliche Vortriebskraft erzeugen und damit den Widerstand vermindern. Einen praktischen Einsatz hat der Mechanismus nicht mehr erfahren. [Archiv Lilienthal-Museum Anklam]

- Welche Verformungen der Tragflächen stellen sich ein?
- Welche Schubkräfte werden in den einzelnen Bewegungsphasen erzeugt?
- Welche Leistungen müssen aufgebracht werden?
- Reichen die erzeugte Schubkraft und Auftriebskraft aus, um das Gewicht des Fliegers auszugleichen und seinen Strömungswiderstand zu überwinden?

Und schließlich:

- Welche Bewegungsabläufe sind es denn, die beide Kräfte optimieren?

Letztlich kreisen alle diese Fragen darum, wie der Flugapparat – und insbesondere seine Auftrieb und Schub erzeugenden Schwingen – mit dem Strömungsmedium interagieren. Es geht also um die Kopplung von Fluid (Strömungsmedium) und Struktur (Flugapparat). Erst in heutiger Zeit, 100 Jahre nach dem ersten Motorflug (1903), werden in der Luftfahrtforschung die Methoden und Algorithmen entwickelt, die mit Hilfe enorm leistungsfähiger Rechner die Gestalt und Bewegung der Tragflächen in ihrem zeitlichen Verlauf in Wechselwirkung mit der umgebenden Strömung zu verfolgen erlauben.

Beschreibung und Analyse der Grundparameter

Flächenbelastung und Gewicht

1869 erscheint in den *Archives néerlandaises* die erste Arbeit, in der das Gewicht G von Vögeln mit der Grundrissfläche S (Spannweite $b \times$ Flügeltiefe l) ihrer Flügelfläche verglichen wird. Die Quadratwurzel aus der Fläche, geteilt durch die dritte Wurzel des Gewichts, ergibt eine nahezu konstante Zahl. Marey erkennt die große Bedeutung dieser Erkenntnis, mit der sich fundamentale Konstruktionsprinzipien in der Natur verbinden. Einen aktuellen Zugang zu solchen Zahlen ermöglicht das Buch *Kolibris und Jumbo-Jets* von Henk Tennekes [3]. Aus beiden Größen kann man eine spezifische Belastung $\gamma = G/S$ der Tragflächen ermitteln. Hervorgehoben sind in Abbildung 3 die Daten zu Beobachtungen an Störchen in Lilienthals Buch und die eines modernen Verkehrsflugzeugs Airbus A340. Die übrigen Kürzel erfahren im Verlauf des Artikels ihre Erläuterungen. Es ist

erstaunlich, dass die so verschiedenen Klassen der künstlichen und natürlichen Flieger sich auf diese Weise charakterisieren lassen. Die doppelt-logarithmische Auftragung verdeckt sicherlich die Streuung unter den Daten. Für die Beantwortung der Frage, ob der Mensch denn auch wie ein Vogel fliegen könnte, ist die eingetragene rote Linie der Mittelwerte aber eine gute Orientierungshilfe. Die Abweichung bei den Flugzeugen bis hin zum tiefsten Datenpunkt *Daedalus* weist auf Konstruktionen in besonderer Leichtbauweise hin.

Die empirischen Daten lassen sich durch eine theoretische Überlegung mit einer Formel $\gamma(G)$ annähern (siehe Kasten 1: Flächenbelastung und Gewicht). Mit wenigen plausiblen Annahmen werden wir danach die wesentliche Frage quantifizieren, welche Leistung wir als Menschen mit Flügeln aufbringen müssten, wenn wir „normale“ Flieger wären.

Rechnet man die Daten bei Marey ([4], S. 233), die sich auf einen Flügel beziehen, in die Konstante k_G für ein Flügelpaar um, so erhält man den Zahlenwert 44,0 im Vergleich zu 46,4 aus den Annahmen in dieser Arbeit für die Konstante k_G , also eine gute Bestätigung dieser theoretischen Überlegung.

Auftrieb, Widerstand und Leistung

Um sich bei einer bestimmten Fluggeschwindigkeit u_0 in der Luft halten zu können, müssen zwei Gleichgewichtsbedingungen erfüllt werden. Bei einem horizontalen Flug muss der dynamische Auftrieb A an den Tragflächen das Gewicht G des Fliegers halten. Die Anströmung verursacht stets einen Strömungswiderstand W , der durch die Schubkraft T überwunden wird. Fällt die Schubkraft aus, dann gleitet der Flieger immerhin noch mit einem für den Flieger jeweils typischen Gleitwinkel zu Boden. Bricht der Auftrieb bei einem überzogenen Flugzustand zusammen, dann gelten nur noch die Gesetze der Schwerkraft, die den Körper unkontrolliert zum Boden trudeln lassen.

Insekten, Vögel und Flugzeuge unterscheiden sich nicht grundsätzlich in den Merkmalen, die einen Flieger auszeich-

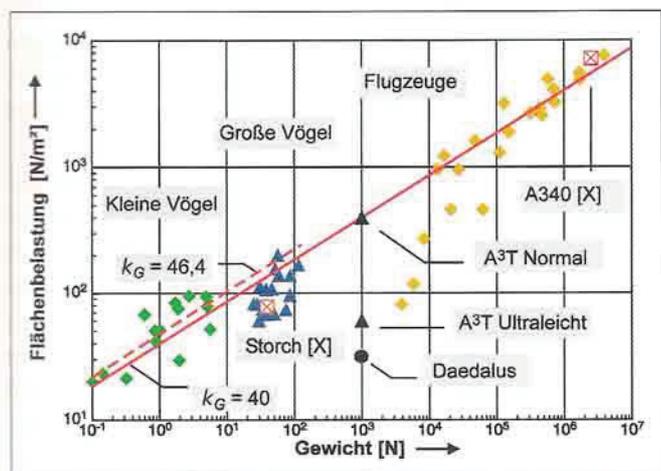


Abb. 3. Die spezifische Belastung γ der Tragflächen von Fliegern ordnet sich über einen großen Bereich um eine Gerade, wenn man sie in doppelt-logarithmischem Maßstab über dem Gewicht des Fliegers aufträgt. Die verschiedenen Abschätzungen von k_G liegen dicht beieinander.

**KASTEN 1:
FLÄCHENBELASTUNG UND GEWICHT**

Die Konstante k_G in der spezifischen Belastung in Abbildung 3

$$\gamma = \frac{G}{S} = k_G \sqrt[3]{G} \tag{1}$$

folgt in einer groben Abschätzung bereits aus dem Gewicht $G = g \cdot \rho_k \cdot d \cdot l \cdot b$ eines rechteckigen Tragflügels. Erforderliche Angaben sind nur seine mittlere Dichte ρ_k , seine mittlere relative Profildicke δ (Dicke d zu Flügeltiefe l) und das Seitenverhältnis $\Lambda = b/l$ von Spannweite b zu Flügeltiefe l . Es folgt:

$$k_G = \left\{ g \rho_k \delta^2 / \Lambda \right\}^{1/3} \tag{2}$$

g ist die Erdbeschleunigung ($\sim 10 \text{ m/s}^2$). Mit $\rho_k = 10^3 \text{ kg/m}^3$ für ein lebendes Gewebe („Wasser“), $1/10$ für die relative Profildicke und 10 für Λ erhält man mit $k_G = 46,4 \text{ N}^{2/3}/\text{m}^2$. In Abbildung 3 ist der Zahlenwert 40 verwendet. Die Darstellung bei Marey ([4], S. 233) entspricht einer Umformung von Gleichung (1) in die Gestalt

$$S^{1/2}/G^{1/3} = k_G^{-1/2} = \text{konstant} \tag{3}$$

nen. Auch Insekten würden sich in die Abbildung 3 einfügen lassen, aber die Streuung wird dann doch deutlich größer. Die physikalischen Prinzipien der Auftriebserzeugung sind stets die gleichen, die Gesetzmäßigkeiten der Entstehung des Strömungswiderstandes lassen sich auch auf Lebewesen übertragen.

Der wesentliche Unterschied liegt in der Art der Erzeugung der Schubkraft. Bei Flugzeugen sind es die Triebwerke, die außerhalb der Tragflächen befestigt sind und die notwendige Schubkraft liefern. Die Lebewesen hingegen erzeugen ihre Schubkraft mit den gleichen Tragflächen, an denen auch der dynamische Auftrieb entsteht.

Damit sich ein dynamischer Auftrieb in der Größe des eigenen Gewichts überhaupt einstellt, muss der Flieger eine bestimmte Startgeschwindigkeit erreichen. Das gilt zunächst einmal für alle Flugzeuge, die mit Triebwerken vom Boden starten. Nun kommt es für den dynamischen Auftrieb nur darauf an, dass die umgebende Luft mit dieser Mindestgeschwindigkeit an den Tragflächen vorbei streicht. Die Bewegungen des Schwingenflugs beschleunigen schon im Stand die Luft nach hinten. Zumindest kleinere Vögel schaffen es deshalb, mit kräftigem Flügelschlag so viel Luft zu beschleunigen, dass sie damit schon aufsteigen können. Aufnahmen von größeren Vögeln wie Schwänen oder Pelikänen zeigen aber, dass diese nur mit großer Anstrengung ihre Startgeschwindigkeit erreichen, um abheben zu können. Man muss also den gleichmäßigen Flug deutlich trennen vom Vorgang des Startens.

Eine wichtige Kennzahl für die Güte eines Fluggerätes ist das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand. Diese Zahl $\epsilon = A/W$ wird Gleitzahl genannt. Typische Werte sind in Tabelle 1 angegeben. Über die zugehörigen Fluggeschwindigkeiten kann man eine Aussage machen, wenn man einen Zusammen-

Flieger	Gleitzahl
Flugmodelle aus Balsaholz	4–6
Kleinere und größere Vögel	8–15
Drachengleiter	10–12
Verkehrsflugzeuge	16–20
Große Gleiter unter den Vögeln	20–25
Segelflugzeuge	30–50

Tab. 1. Gleitzahl $\epsilon = A/W$ (Verhältnis von Auftriebskraft zu Widerstandskraft) bei verschiedenen Fliegern.

hang zwischen der Auftriebskraft und der Gestalt der tragenden Flächen hergestellt hat. Lilienthal hat dazu als erster systematische Untersuchungen durchgeführt und erkannt, dass sich die Tragkraft einer Tragfläche näherungsweise durch eine konstante Kennzahl c_A beschreiben lässt, wenn man den als Tragkraft wirkenden Auftrieb A auf die Grundrissfläche S und den jeweiligen Staudruck q_0 bezieht. Dies drückt Gleichung (4) in Kasten 2 aus.

Die Auftriebsbeiwert genannte Kennzahl c_A hängt vom Querschnitt der Tragfläche, dem Profil, ab und verringert sich mit abnehmendem Seitenverhältnis (allgemein $\Lambda = b^2/S$, b der Abstand zwischen den beiden äußeren Flügelenden). Ursachen der Abminderung sind der Druckausgleich an den

KASTEN 2:

AUFTRIEB, WIDERSTAND UND LEISTUNG

Über weite Geschwindigkeitsbereiche ist der an einer Tragfläche bei der Geschwindigkeit u_0 hervorgerufene Auftrieb A , die Kraft senkrecht zur Bahnrichtung, proportional zur Grundrissfläche S und dem so genannten Staudruck q_0

$$A = c_A \cdot S \cdot q_0 \tag{4}$$

Die Proportionalitätskonstante c_A heißt *Auftriebsbeiwert*. Entsprechend wird auch der Strömungswiderstand W durch einen *Widerstandsbeiwert* beschrieben:

$$W = c_W \cdot S \cdot q_0 \tag{5}$$

Die mit Schub T zur Überwindung des Strömungswiderstands vom Flieger aufzubringende Leistung ist $P = W \cdot u_0$. Der zugehörige Leistungsbeiwert c_{Tl} ist zahlenmäßig ($W + T = 0$) so groß wie der Widerstandsbeiwert:

$$c_{Tl} = P / (S \cdot q_0 \cdot u_0) \tag{6}$$

Der Auftrieb steht definitionsgemäß senkrecht auf der Bahnrichtung und verlangt daher keine zusätzliche Leistung. Die Leistung P des Fliegers bezogen auf seine Gesamtmasse M heißt die spezifische Leistung $w = P/M$ (W/kg). Der Staudruck

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho u_0^2 \tag{7}$$

für ein Fluid der Dichte ρ hat die Dimension N/m^2 . Motiviert wird die Definition durch den Energieinhalt $\frac{1}{2} \Delta m \cdot u_0^2$ einer kleinen Masse Δm in der Anströmung je Volumeneinheit ΔV ($\rho = \Delta m / \Delta V$). Für die Dichte ρ der Luft sei stets $1,2 \text{ kg/m}^3$ eingesetzt.

seitlichen Rändern der Tragfläche und das als unvermeidliche Folge entstehende Paar von Randwirbeln hinter dem Flieger. Ein großer Teil der Energie, die fortwährend als Schubleistung aufzubringen ist, bleibt als Bewegungsenergie dieses Wirbelpaares im Fluid zurück. Die Vögel nutzen diese Wirbel beim Formationsflug; sie können aber ebenso stören und erzwingen größere Abstände beim Landeanflug von Flugzeugen. Der andere Teil der Energie überwindet den Reibungswiderstand.

Da der Strömungswiderstand definitionsgemäß die Kraft in Richtung der Flugbahn und der Auftrieb die Kraft senkrecht dazu ist, lässt sich für den Reiseflug die erforderliche Flugleistung P angeben. Leistung ist allgemein definiert als *Kraft \times Geschwindigkeit*, hier also *Strömungswiderstand \times Fluggeschwindigkeit* (vgl. Kasten 2).

Wie realistisch ist der menschliche Schwingenflug?

Eine erste Abschätzung

Eine Gleitzahl von 10 für einen menschlichen Schwingenflieger ist nach Tabelle 1 ein vernünftiger Wert. Mit zwei weiteren Annahmen über das Gewicht des Piloten (750 N, d. h. rund 75 kg Masse M) und das Gewicht des Fluggeräts von 250 N gilt es, die Daten für einen Flieger von $G = 1000 \text{ N}$ zu finden.

In dieser ersten Schätzung sei in Abbildung 3 der Datenpunkt zu diesem Gewicht verfolgt, der mit *Normal* bezeichnet ist. Die Abkürzung A^3T in der Abbildung stammt vom Autor, der in seinem Projekt „Advanced Adaptive Airplane Technologies“ den möglichen Nutzen des Schwingenflugs bei Lebewesen für technische Anwendungen studiert. Als spezifische Belastung der Tragflächen wird 400 N/m^2 angezeigt. Bei dieser Vorgabe reicht eine Tragfläche mit $2,5 \text{ m}^2$ Grundriss aus, um 1000 N zu tragen. In den nachfolgenden Rechnungen ist $c_A = 0,8$ gesetzt. Dazu ist der Wert $c_A \cong 1$ für ein Profil mit einem Faktor $\Lambda / (\Lambda + 2)$ korrigiert worden, der das endliche Seitenverhältnis näherungsweise berücksichtigt ($\Lambda = 8$ angenommen).

Nach der Formel (4) für den Auftrieb wird zu 1000 N und dem ermittelten Grundriss S der erforderliche Staudruck für Gleichung (7) bestimmt, aus dem die Geschwindigkeit $u_0 = 28,8 \text{ m/s}$ folgt. Daraus und aus der unterstellten Gleitzahl 10 folgt die erforderliche Leistung P die vom Piloten aufzubringen wäre. Der Leistungsbedarf beträgt mindestens 2880 W . Diese Leistung kann kein menschlicher Organismus erzeugen! In die Reihe der „normalen“ Flieger (vgl. Abb. 3) wird sich ein menschlicher Schwingenflieger also niemals einreihen können.

Man muss also fragen, welche Leistung ein *trainierter* menschlicher Organismus aufzubringen in der Lage ist, und ob man für diesen Leistungsbereich Fluggeräte bauen kann, die zum Schwingenflug fähig sind. Dies führt zu einer leistungsorientierten Abschätzung der potentiellen Flugfähigkeit des Menschen. Bevor wir entsprechende Berechnungen anstellen, ist also zu fragen: Was wissen wir über unser Leistungsvermögen?

Exkurs: Mechanische Leistungsabgabe beim Menschen

Eine Arbeit von Robert Josephson aus dem Jahre 1985 klärt die Frage nach der möglichen Leistungsabgabe von Muskeln schon weitgehend [5]. Seine Untersuchungen ergeben bei einem Insektenmuskel, der periodisch stimuliert wird, für die spezifische Leistung einen Maximalwert von 76 W je kg Muskelmasse. Geht man bei einem Menschen von 75 kg Masse davon aus, dass 10% seines Körpergewichts als Muskelmasse an der Erzeugung der Leistung beteiligt ist, dann erhält man einen Wert $w = 7,5 \text{ W/kg}$, bezogen auf das ganze Körpergewicht. Für fliegende Lebewesen mit einem ungleich höheren Anteil der Flugmuskeln am Körpergewicht werden in der Arbeit Zahlen von 20 bis 30 W/kg genannt, für Spitzensportler im Bereich einiger 10 Minuten bis zu 400 W absolute Leistung, also etwa 5 W/kg bei 75 kg Körpermasse. Das ist deutlich weniger als obiger Wert von 7,5 W/kg. Es leuchtet ein, dass bei einem Menschen die Zeitdauer eine große Rolle spielt, während der die Leistung aufgebracht wird. Der Autor hat dazu selbst Auswertungen durchgeführt und in Tabelle 2 einige Zahlen zusammengetragen, die obige Zahlen noch überschreiten.

Sportler	P [W]	w[W/kg]	T[min]
Pilot Schwingenflieger	600	8,0	10?
Miguel Indurain (Ergometer)	550	7,1	20
Jan Ulrich (Tour de France '97)	480	6,4	38
Eddy Merckx (Ergometer)	440	5,9	60
Kan. Kanellopoulos (Flug)	225	3,1	235

Tab. 2. Leistungen (P) und spezifische Leistungen (w) verschiedener Radsportler. Der Pilot für den Schwingenflieger soll 75 kg Normalgewicht haben. Er muss auch die Muskulatur der Arme einsetzen, um die erforderliche Leistung aufzubringen. Bei 600 W entsprechen 15% Anteil am Körpergewicht 53 W je kg Muskelmasse.

Die letzte Zahlenreihe ist besonders interessant, weil die Leistung in einem Flugapparat aufgebracht wurde (Abb. 4). Am 23. April 1988 flog der griechische Radrennfahrer Kanellos Kanellopoulos in dem Ultraleichtflugzeug *Daedalus* mit pedalbetriebenem Propeller die 117 km lange Strecke von Heraklion auf Kreta zur Insel Santorin mit durchschnittlich 8,3 m/s. Auf Grund eingehender physiologischer Untersuchungen und aerodynamischer Rechnungen wurde die durchschnittlich abgegebene mechanische Leistung mit 225 W ermittelt [6]. Kanellopoulos wog 73 kg und brachte somit eine spezifische Leistung von 3,1 W/kg auf. Der Flug dauerte 3 h und 55 min.

Daedalus ist ein Flugzeug mit 34,1 Meter Spannweite und hat ein Seitenverhältnis von fast 38, was eine enorme Streckung bedeutet. Die Masse der Flugmaschine beträgt 31 kg. Die Flügelfläche hat den Wert von 30,84 m². Aus diesen Zahlen folgt die spezifische Belastung 33 N/m², die in Abbildung 3 als *Daedalus* eingezeichnet ist. Die Gleitzahl ϵ wird mit etwa 40 angegeben. Als Beiwert für den Auftrieb errechnet man $c_A = 0,82$, somit einen Widerstandsbeiwert $c_W = 0,02$ oder 26 N erforderliche Schubkraft.

Für die kurze Zeit von 10 Minuten ist die Annahme von 600 W Leistung durchaus realistisch. Eine aktuelle Darstel-



Abb. 4. Das Fluggerät Daedalus im Boston Museum of Natural History mit fußbetriebenem Propeller. Auch ein menschlicher Schwingenflieger wird eine ähnliche Konstruktion der Pilotenkabine haben müssen. Nur unter optimalem Einsatz der Beinmuskulatur kann der menschliche Körper die geforderte Leistung aufbringen, die in eine Schwingenbewegung der Tragflächen umgesetzt wird. [Photo mit freundlicher Genehmigung von John H. Lienhard, Houston University]

lung zu Leistungsgrenzen im Radsport findet sich bei G. Neumann [7].

Eine zweite Abschätzung

Für die zweite Abschätzung wird der Weg beschränkt, zuerst die Leistung vorzugeben und dann nach den Flugbedingungen zu fragen. Das Ziel sei ein Kurzflug von wenigen Minuten Dauer, für den obiger Grenzwert von 600 W verfügbarer Leistung unterstellt wird.

Neben der oberen Begrenzung der Geschwindigkeit eines Flugzeuges durch die einsetzende Instabilität („Flattergrenze“ – sie sei nur der Vollständigkeit halber erwähnt, denn das Flattern einer Tragfläche und Schwingenflug schließen sich gegenseitig physikalisch aus) gibt es auch eine untere Grenze, bei der die Strömung auf der Oberseite der Tragflächen nicht mehr anliegt und Unterdruck erzeugt, sondern sich großflächig „ablöst“. Wenn sich ein solcher Fall ankündigt, muss der Pilot die „Nase des Flugzeugs“ nach unten drücken und schnellstens wieder die Fluggeschwindigkeit erhöhen. Diese untere Grenze ist die Mindestgeschwindigkeit. Sie liegt bei Drachengleitern, an deren Konstruktion man sich beim Bau eines Schwingenfliegers orientieren wird, bei 7 bis 8 m/s. Neben einer Leistung von etwa 600 W sei eine Fluggeschwindigkeit von $u_0 = 12 \text{ m/s}$ (also $q_0 = 86,7 \text{ N/m}^2$) die zweite Vorgabe; sie hat einen deutlichen Abstand zur Mindestgeschwindigkeit. Man darf durchaus unterstellen, dass man diese Geschwindigkeit am Boden erreichen kann, um auch einen Start aus eigener Kraft durchzuführen.

Um bei dieser Geschwindigkeit 1000 N Gewicht zu tragen, muss die Flügelfläche 14,5 m² betragen. Dabei ist der gleiche Auftriebsbeiwert 0,8 angenommen wie in der ersten Abschätzung. Ein Flieger mit einer Spannweite b von 11 m, der an der Flügelwurzel 1,8 m und an der Flügelspitze 0,9 m Flügeltiefe hat, erfüllt diese Bedingungen. Das Seitenverhältnis Λ beträgt 8. Ausgehend von einer menschlichen Leistung von 600 W und einer idealen Kraftübertragung ohne Verluste

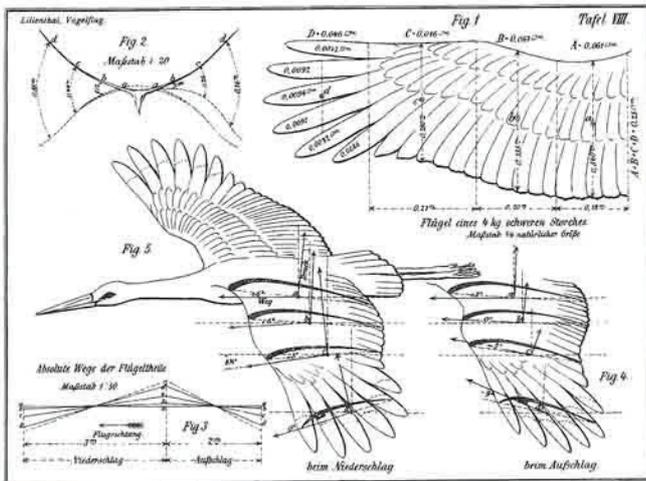


Abb. 5. In dieser Abbildung aus Lillenthal's Buch (Tafel VIII, [16]) sind die wesentlichen Merkmale des Schwingenflugs zusammengefasst. Schlagen, Drehen und Schwenken sind die kinematischen Grundmuster (vgl. auch Abb. 8). Beim Aufschlag ist der Flügel positiv angestellt (rechts unten), beim Abschlag (Niederschlag) negativ verdreht (unten, Mitte). Der kürzere absolute Weganteil beim Aufschlag wird durch das Zurückziehen des Flügels (Schwenken) beim Aufschlag erreicht. Lillenthal gibt eine Fluggeschwindigkeit von 12 m/s an. Die Schlagfrequenz ist etwa 2 Hz.

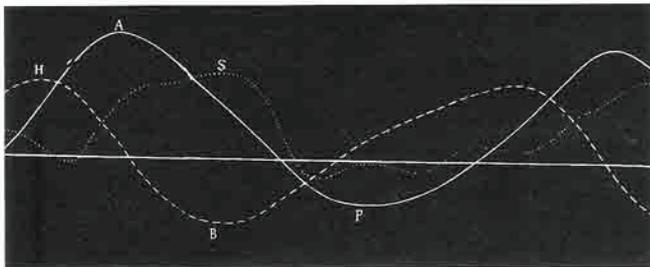


Abb. 6. Fig. 110 aus Mareys *La Machine Animale* mit den drei Freiheitsgraden der Bewegung (Verlauf von rechts nach links): Schlagen (HB), Drehen (S) und Schwenken (AP), gemessen an einem Bussard. Das Schwenken wird wie bei Lillenthal auch indirekt sichtbar durch den längeren absoluten Weganteil des Abschlags. Die Spuren der Nadeln seiner Druckmesser auf Rußwalzen sind ein bedeutendes historisches Zeugnis. Für eine quantitative Auswertung bedürfte es einer genauen Analyse des gesamten Datenmaterials nach heutigen Gesichtspunkten. Aus [4]

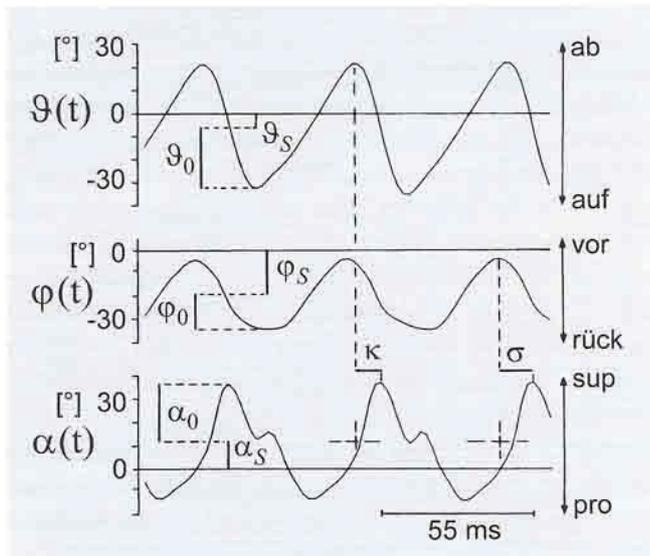


Abb. 7. Die drei Bewegungen Schlagen, Schwenken und Drehen (von oben nach unten) des Vorderflügels einer Wanderheuschrecke [17]. Das einfachste Modell eines Tierflügels verlangt 10 Parameter unter der Annahme einer harmonischen Schwingung der drei Bewegungsanteile: Drei stationäre Werte (Index „S“) und drei Amplituden der instationären Bewegung (Index „0“). Zwei Phasenlagen κ des Schlagens und σ des Schwenkens relativ zur Drehung als Bezugsbewegung. Ferner die Schlagfrequenz $f = 1/(55 \text{ ms}) = 18 \text{ Hz}$ und die Geschwindigkeit von $u_0 = 2,5 \text{ m/s}$, die dem Bild nicht zu entnehmen ist.

stünde bei der Fluggeschwindigkeit 12 m/s die Schubkraft 50 N zur Verfügung, woraus die Gleitzahl $A/W = 20$ folgt.

Dieser Wert fordert eine deutlich höhere Qualität des Flugapparats als der Wert 10 in der ersten Abschätzung. Ein solcher Schwingenflieger mit einer spezifischen Belastung von 69 N/m^2 ist in Abbildung 3 als *Ultraleicht* eingetragen.

Die Qualität, gemessen an der Gleitzahl, muss für die vorgegebene Leistung von 600 W aber noch höher sein, denn eine ideale Kraftübertragung gibt es nicht. Außerdem kann nicht die gesamte Leistung, die über Muskelkraft die Tragflächen bewegt, in Schubleistung umgewandelt werden. Um den nutzbaren Anteil bei der Umwandlung von Schlag- in Schubleistung zu ermitteln, muss der Mechanismus des Schwingenflugs genauer betrachtet werden.

Mechanismus des Schwingenflugs

Beobachtung der Bewegung

Die physikalischen und konstruktiven Eckdaten für *Daedalus* und *Ultraleicht* zeigen, dass Aerodynamik, Struktur und Flugleistung eng miteinander verflochten sind. Es soll nun untersucht werden, ob der Mechanismus der Erzeugung von Schubkraft mit Schwingenflug (Flapping Flight) eine Kraftentfaltung gestattet, für die nicht mehr als 600 W menschliche Leistung aufgebracht werden müssen und wobei gleichwohl 1000 N getragen werden können. Diese letzte Vorgabe ist bereits durch die Parameter Grundrissfläche, Auftriebsbeiwert und Bahngeschwindigkeit „erfüllt“. Es bleibt jetzt zu prüfen, ob auch die erforderliche Schubleistung aufgebracht werden kann. Hierzu müssen wir kurz auf die Bewegungsweise der Auftrieb und Vortrieb erzeugenden Flügel eingehen.

Es ist bis heute kaum bekannt, dass die ersten Zeitfunktionen von Flügelbewegungen bereits bei Marey zu finden sind (Abb. 6). Die anschaulichste Darstellung ist von Lillenthal gezeichnet und in Abbildung 5 wiedergegeben. In der Bildunterschrift wird auf die wesentlichen Merkmale hingewiesen. Die moderne Variante der Beobachtung zeigt Abbildung 7 am Beispiel des Vorderflügels einer Wanderheuschrecke. Solche Messungen haben erstmals eine vollständige Datenbasis geliefert für den Vergleich mit einem theoretischen Modell des Tierflugs des Autors [8].

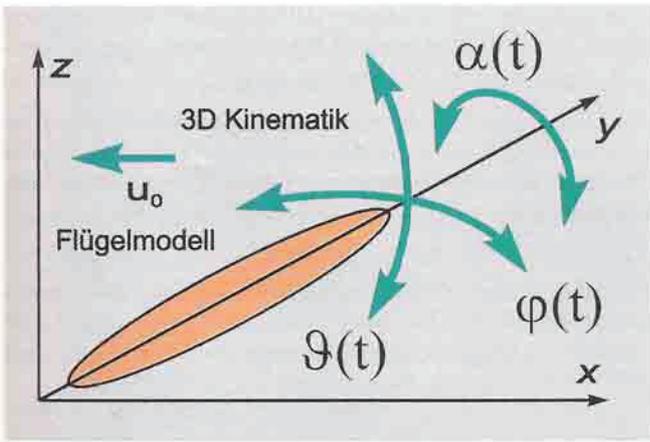


Abb. 8. Das einfachste Modell für die Bewegung eines Tierflügels geht von Drehungen einer starren Tragfläche in einem punktförmigen Gelenk aus: Schlagen $\vartheta(t)$, Drehen $\alpha(t)$ und Schwenken $\varphi(t)$. Die gleichförmige Bahnbewegung u_0 kommt als vierter Freiheitsgrad hinzu.

Die Bewegungen von Vögeln und Insekten verbindet ein einziges zentrales strömungsmechanisches Prinzip der Schuberzeugung, das im Kern auf drei Freiheitsgraden der Bewegung beruht: Schlagen, Drehen und Schwenken des Flügels (Abb. 8). Die gleichförmige Bewegung des Rumpfes in Bahnrichtung (Translation) kommt als vierter Freiheitsgrad hinzu. Die ersten drei Bewegungen finden relativ zum Rumpf statt, dessen Querbewegung als Reaktion auf die Luftkräfte an den Flügeln im theoretischen Modell vernachlässigt wird. Vom Autor ist auch ein vereinfachtes Rechenmodell entwickelt worden, das die Entstehung der Schubkraft quantitativ erläutert [9]. Alle Modelle gehen aus von der grundlegenden Beschreibung Ludwig Prandtls und seines Schülers Birnbaum, wie mit periodischem Schlagen und Drehen einer Tragfläche Schubkraft erzeugt werden kann. Formelmäßige, so genannte analytische Lösungen sind erstmals um 1930 entwickelt worden (Näheres in [8]).

Wie eingangs schon erwähnt wurde, wird es erst heute möglich, den Mechanismus des Schwingenflugs nicht nur

mit vereinfachten physikalischen Modellen zu beschreiben, sondern diese Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur mit aufwendigen numerischen Verfahren direkt zu erfassen. Erstmals hat eine Konferenz des Vereins Deutscher Ingenieure im Sommer 2002 auf breiter Basis eine Bilanz des vorhandenen Wissens zu diesem Thema gezogen [10].

Der Reiz ist deshalb groß, alle theoretischen Kenntnisse in die Waagschale zu werfen und den Bau eines menschlichen Schwingenfliegers erneut zu versuchen, wobei die Liste der unvollendeten Unternehmungen hierzu durchaus entmutigen kann. Auch sind die einfachen Bewegungsformen der theoretischen Beschreibung Abstraktionen, die in der Natur in vielfältiger Weise abgewandelt und dadurch noch optimiert werden; und die mechanischen Eigenschaften von Tierflügeln sind bis auf den heutigen Tag schwer nachzubilden, teils kaum ermittelbar, weil zum Beispiel bei den filigranen Insektenflügeln die mechanische Analyse eines toten, extrem schnell trocknenden Flügels nur unzulängliche Erkenntnisse über die elastischen Eigenschaften des lebenden Flügels liefert.

Lösungen des Umströmungsproblems

Jeder fliegende Körper verdrängt das umgebende Fluid, das mit Druck und Schubspannung auf jeden Teil der Oberfläche des Flugapparats zurückwirkt. Die Frage nach dem umgebenden Strömungsfeld und den Kräften des Fluids sei hier als *Umströmungsproblem* bezeichnet. Seine Lösung ergibt die örtlichen Kräfte, die das Fluid auf die Oberfläche ausübt. Aus ihnen lassen sich dann die globalen Kräfte Auftrieb und Widerstand ableiten. Diese bilden zusammen mit den Kenntnissen über die Bewegungsweise (Kinematik) der Tragflügel die Grundlage, um die erforderlichen Leistungen für den Schwingenflug abzuschätzen.

Es gehört zur Besonderheit dieser Wechselbeziehung, dass die Schubkräfte, die den Widerstand des Fliegers überwinden sollen, an den gleichen Flächen entstehen, die zugleich auch den dynamischen Auftrieb entwickeln. Hat man die eine Komponente als Messung oder Vorgabe, muss die

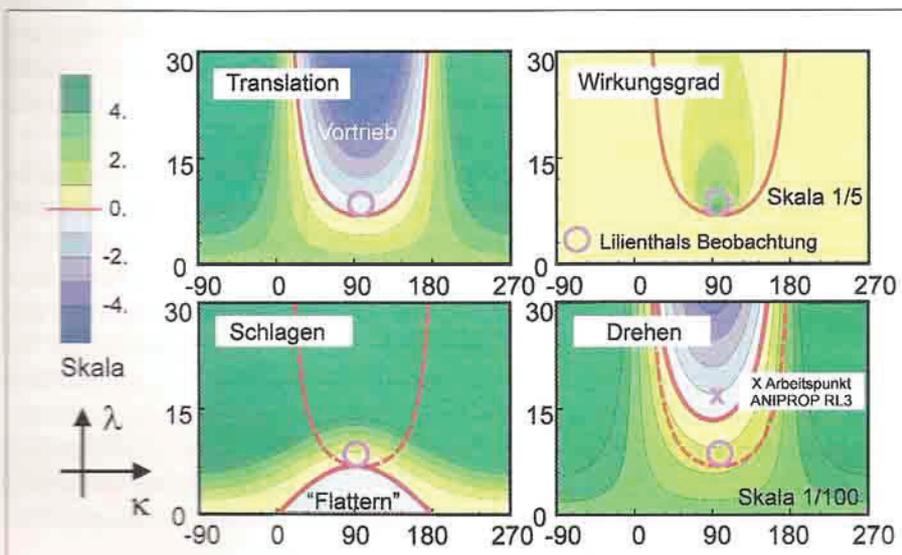


Abb. 9. Beiwerte der über eine Schwingungsperiode gemittelten Leistung in Bahnrichtung (Translation) sowie aufgebrauchter Schlag- und Drehleistung, alle bezogen auf das Quadrat der Drehamplitude. Wirkungsgrad als Verhältnis von erzielter Vortriebsleistung zu aufgebrauchter Leistung beim Schlagen und Drehen. Achse der Drehbewegung bei 1/4 der Flügeltiefe hinter der Vorderkante, Kennzahl $\omega^* = 0,15$ (vgl. S. 72 rechts).

andere damit verträglich sein. Darin unterscheidet sich der Schwingenflug grundsätzlich von einem Flug mit starren Flügeln und Triebwerksantrieb.

Eine genauere Untersuchung zeigt, dass das Schwenken nicht erforderlich ist, um Schubkraft zu erzeugen. Das Schwenken ermöglicht es zwar, bei gleicher Auslenkung eine weitaus größere Schubkraft zu erzeugen. Hierzu ist allerdings auch eine höhere Leistung erforderlich. Das Schwenken wird daher im folgenden, vereinfachten Modell zunächst ausgeklammert.

In Abbildung 9 sind die Leistungsbeiwerte der drei Freiheitsgrade Translation, Schlagen und Drehen in Form von farbig skalierten Flächen und ferner der dabei realisierbare Wirkungsgrad dargestellt. Ausgangspunkt ist ein nach den vorherigen Angaben berechneter Schwingenflieger. Stets findet zugleich Schlagen und Drehen einer Tragfläche statt, berechnet für einen Profilquerschnitt mit der Flügeltiefe l .

Schlagen und Drehen sind im Modell harmonische, das heißt sinusförmige Bewegungen mit der Schlagamplitude h_0 und der Drehamplitude α_0 . Alle vier Graphiken haben die gleiche Abszisse κ von -90 bis $+270$ Grad und die gleiche dimensionslose Ordinate λ von 0 bis 30. Die Ordinate λ ist definiert durch das Verhältnis von Schlagamplitude, bezogen auf $l/2$, zu Drehamplitude in Bogenmaß

$$\lambda = [h_0 / (l/2)] / \alpha_0,$$

die Abszisse κ die Voreilung des Schlagens gegenüber der Drehung (siehe Abb. 7). Der Bezug auf die halbe Flügeltiefe hat sich als Konvention erhalten, weil die Tragflächen in den frühen Arbeiten in die Mitte eines Koordinatensystems gelegt wurden.

Für $\kappa = 90^\circ$ ist die Drehung des Flügels beim Aufschlag am größten, wie dies Lilienthal in Abbildung 5 (Fig. 4) dargestellt hat. Seine Daten sind näherungsweise umgesetzt in ein Koordinatenpaar (κ, λ) in den vier Diagrammen (violetter Kreis). Die physikalischen Parameter orientieren sich an den Daten von Lilienthals Storch in Abbildung 5. Die vier Diagramme in Abbildung 9 zeigen unter den Stichworten:

Translation: Beiwert der Leistung in Bahnrichtung. Ein negativer Wert bei der Translation zeigt Vortrieb an. Zahlenmäßig muss dieser Wert exakt im Gleichgewicht mit dem Widerstandsbeiwert stehen. Die rote Linie grenzt den Bereich ab, innerhalb dessen Vortrieb überhaupt erzielt wird.

Schlagen: Beiwert der Leistung für den Flügelschlag, in dem sich die physisch aufzubringende Muskelarbeit niederschlägt. Die gestrichelte rote Linie ist aus der Graphik für die Translation übertragen. Der hellblaue Bereich unterhalb der Linie zeigt den Bereich von Amplitudenverhältnissen, in dem die Schlagbewegung Leistung aus der Strömung entnehmen kann („Flattern“ – gekennzeichnet durch vergleichsweise große Drehung).

Drehen: Beiwert der Leistung, mit der die Tragfläche ihren Anstellwinkel gegenüber der Strömung verändert. Man beachte den um den Faktor 100 kleineren Wert gegenüber dem Schlagen; also ist sehr wenig Drehleistung erforderlich.

Wirkungsgrad: Verhältnis von erzielter Vortriebsleistung zu aufgebrachtener Leistung beim Schlagen und Drehen. Die

rote Linie ist aus der Translation übertragen. Nur für negative Leistung in Bahnrichtung ist der Schubwirkungsgrad sinnvoll definierbar.

Den Berechnungen liegt die dimensionslose Kennzahl ω^* zugrunde. Sie heißt *reduzierte Frequenz* und lässt sich mit relativ wenig Aufwand für die meisten Lebewesen bestimmen. Es müssen nur mittlere Flügeltiefe, Schlagfrequenz f und Fluggeschwindigkeit bekannt sein ($\omega^* = 2\pi f \cdot (l/2) / u_0$).

Anschaulich ist die reduzierte Frequenz ω^* das Verhältnis von Flügeltiefe zu zurückgelegtem Weg während einer Flügelschlagperiode und somit ein Maß dafür, wie „instationär“ die Bewegung ist. Je kleiner ω^* ist, desto größer ist die Wegstrecke, die pro Flügelschlag zurückgelegt wird.

Für Lilienthals an Störchen erhobene Daten, die Abbildung 9 zugrunde liegen, beträgt der Wert 0,15. ω^* liegt auch für den Vorderflügel der Heuschrecke bei etwa 0,15. Zwei ganz unterschiedliche Lebewesen werden auf diese Weise mit der gleichen theoretischen Rechnung beschrieben, weshalb der *reduzierten Frequenz*, neben der Reynoldszahl für die Zähigkeit und der Machzahl für die Geschwindigkeit, in der Strömungsmechanik eine große Bedeutung zukommt. Bei großen Vögeln kann die reduzierte Frequenz unter 0,05 liegen und bei kleinen Insekten noch über 0,5. Beide Werte markieren in etwa die Grenzen, in denen Organismen fliegen können. Eine reduzierte Frequenz unter 0,05 erfordert einen extrem widerstandsparmen Körperbau, wie er etwa den Albatros kennzeichnet ($\omega^* = 0,03$ nach [11]). Mit wachsender reduzierter Frequenz ergeben sich immer größere Phasenverschiebungen zwischen den Bewegungen des Flügels gegenüber dem Fluid und den daraus resultierenden Kräften auf den Flügel. Zugleich wird das Verhältnis λ von Schlagen zu Drehen für einen optimalen Wirkungsgrad immer kleiner (siehe [9]) und erfordert immer größere Drehamplituden, um genügend Vortrieb zu erzeugen; die Schlagmuskulatur verliert ihre beherrschende Rolle.

Ein interessanter Aspekt ist die Tatsache, dass die aktive Drehung zwar für gute Wirkungsgrade erforderlich ist, aber praktisch keinerlei Leistung benötigt. Man kann sich in der Leistungsbilanz ganz auf die Schlagleistung konzentrieren. Verzichtet man bei Modellen für den Schwingenflug auf hohe Wirkungsgrade, so ist die Drehung passiv angeregt (blauer Bereich): Die reine Schlagbewegung ruft auf dem Flügel eine bestimmte Druckverteilung hervor, die zugleich den Flügel in die „richtige“ Richtung zu verdrehen vermag. Hat der Flügel an wohldefinierter Stelle entsprechende Elastizitätseigenschaften, so kann dieser Effekt sehr effizient genutzt werden.

In diesem Bereich arbeitet der künstliche Vogel, den der Autor zusammen mit dem Feinmechaniker Felix Scharstein in einem Versuchsstand zur Physik des Fliegens, dem Rundlauf ANIPROP RL3, verwirklicht hat ([12,13]; für eingehende Informationen siehe [8]).

Zur Benutzung der vier Diagramme sei noch angemerkt, dass sie von einem einzigen theoretischen Modell beschrieben werden, also nicht unabhängig voneinander sind. Sie werden nachfolgend als Kennfelder benutzt, in denen man die Vorgaben (z. B. optimaler Wirkungsgrad) auswählt und danach die Parameter an Ordinate und Abszisse abliest. Die erforderliche Drehamplitude folgt aus der gewünschten Leistung, die als absoluter Wert vorgegeben ist (z. B. die verfügbare Schlagleistung). An dieser Stelle gehen Grundrissfläche und Fluggeschwindigkeit ein. Es folgt die Schlagfrequenz als absoluter Wert in Hz. Aus der Drehamplitude ergibt sich die zugehörige Schlagamplitude.

Leistung beim Schwingenflug

Die Kennzahl $\omega^* = 0,15$ gilt ebenfalls für den nun zu berechnenden Schwingenflieger. Mit den in der zweiten Abschätzung ermittelten Größen $l = 1,4$ m als Mittelwert der Flügeltiefe (zwischen Wurzel und Spitze) und 12 m/s Geschwindigkeit ergibt sich eine Schlagfrequenz von 0,4 Hz, also 2,5 Sekunden für einen Flügelschlag. Die Leistung beim Schlagen wäre nach Gleichung (6) mit einem Leistungsbeiwert von $c_{\text{IT}} = 1$ (im violetten Kreis von Lilienthals Daten) $P = l \cdot q_0 \cdot S u_0 \cdot \alpha_0^2$. Da alle Kräfte und Geschwindigkeiten jeweils proportional zu einer Amplitude sind, sind alle Leistungsbeiwerte in Abbildung 9 auf das Amplitudenquadrat α_0^2 bezogen worden. Mit den vorgegebenen Parametern ermittelt man aus der Schlagleistung P zunächst diese Amplitude (in Bogenmaß).

Der Graphik entnimmt man auf der Ordinate den ungefähren Wert $\lambda = 9$. Dieser Wert kennzeichnet ein bestimmtes Verhältnis von Schlag- und Drehamplitude. Damit dieser Wert über die ganze Spannweite für die Tragfläche gültig bleibt, muss die örtliche Drehung – komplizierter als bei der starren Drehung in Abbildung 8 – als Verwindung von 0 Grad an der Flügelwurzel auf α_0 an der Flügelspitze linear zunehmen, wie dies analog für die örtliche Schlagamplitude gilt. Ein Flügel mit dieser Kinematik kann statt der Schlagleistung P nur noch etwa $P/3$ als Leistung umsetzen, da auch eine Zuspitzung des Flügels von l an der Wurzel auf $l/2$ an der Spitze angenommen worden war.

Bei einer rechteckigen Tragfläche stimmt der Wert $P/3$ genau, wenn die Drehamplitude linear von der Wurzel zur Spitze zunimmt; bei der zugespitzten Flügelform sind es $0,28 P$. Für interessierte Leserinnen und Leser steht ein elektronisches Datenblatt zur Verfügung (Microsoft Excel), mit dem alle voranstehenden Überschlagsrechnungen nachvollzogen werden können [14]. Das Datenblatt enthält die Theorie der ebenen, schwingenden Tragfläche für gekoppelte Schlag- und Dreh-schwingung, wie sie um 1930 entwickelt worden ist.

Statt der Leistung P kann ebenso der Wirkungsgrad vorgegeben werden. Für den Wert 0,8 (genau bei $\kappa = 95^\circ$, $\lambda = 8,4$) wird die angestrebte Schlagleistung von 600 W bei einer Drehamplitude von etwa 25° an der Flügelspitze erreicht (ein größerer Wirkungsgrad würde die erzielte Schubkraft unnötig reduzieren und gleichzeitig zu große Amplituden verlangen). Dort ist die Amplitude des Schlags 1,7 m, also 3,4 m von Spitze zu Spitze. 480 W stehen als Schubleistung zur Verfügung oder 40 N. Bei 1000 N Auftrieb müsste die Gleit-zahl des Flugapparats nunmehr bei 25 liegen. Das entspricht einem Widerstandsbeiwert von 0,03, der mit der aufgebracht-ten Leistung von 600 W überwunden werden kann.

Bei Lebewesen wird eine ausgeprägte Schwenkbewegung beobachtet. Die Theorie zeigt, dass bei gleicher Schlagauslenkung durch Schwenken bis zu 50% mehr Schubkraft aufgebracht werden kann, ohne dass der Wirkungsgrad sich nennenswert ändert. Bei einem künstlichen Schwingenflieger ließe sich über zusätzliche Schwenkbewegungen eine wirkungsvolle Begrenzung der doch recht großen Amplitude erzielen.

Zusammenfassung und Bewertung

Ein menschlicher Schwingenflieger mit einer Gleitzahl 25 liegt deutlich über den üblichen Drachengleitern, aber auch unter der Grenze von modernen Segelflugzeugen. Der Autor ist überzeugt, dass ein menschlicher Schwingenflieger mit modernen Werkstoffen für einen überdurchschnittlich trainierten Athleten gebaut werden kann, der für 5 bis 10 Minuten die geforderten rund 600 W leistet.

Die voranstehenden Abschätzungen müssen mit Werkzeugen der numerischen Strömungsmechanik genauer belegt werden, und sie haben auch eine gewisse Variationsbreite. Vielleicht lassen sich sogar Effekte zur Auftriebssteigerung produzieren, über die in dieser Zeitschrift schon an früherer Stelle berichtet worden ist [15]. Diese würden die geforderte Leistung weiter verringern. Die Genauigkeit der Auslegung eines Flugapparats sollte aber einen Fehler von vielleicht 10% nicht überschreiten. Dazu ist es erforderlich, die Wechselwirkung der elastischen Tragflächen mit der umgebenden Luft bei großen Amplituden zu berechnen. Die Zähigkeit der Luft darf dabei nicht vernachlässigt werden und verlangt deshalb so genannte instationäre 3D-Lösungen der Navier-Stokes Gleichungen. Die aktuellen Forschungen auf diesem Gebiet verheißen zwar bereits die Lösung eines Problems wie des hier skizzierten, aber die Nagelprobe für diese Zuversicht steht noch aus!

Danksagung

In diesen Artikel sind viele Informationen eingegangen, die der Autor wertvollen Gesprächen und Hinweisen in teils langjähriger Zusammenarbeit verdankt. Ohne diesen Hintergrund hätte der Artikel kaum entstehen können. Genannt seien an dieser Stelle Frau Biruta Kresling in Paris, Dr. Hans Scharstein in Köln, Prof. Dr. Wolfram Zarnack in Göttingen und Dr. Bernd Lukasch vom Lilienthal Museum in Anklam.

Literatur

- [1] J. P. Richter: The Literary Works of Leonardo da Vinci Vol. II. London 1883. – [2] E. v. Holst, Biol. Zentralblatt 63, 289 (1943). – [3] H. Tennekens: Kolibris und Jumbo-Jets. Birkhäuser-Verlag, Basel 1997. – [4] E. J. Marey: La Machine Animale. Paris 1891. – [5] R. K. Josephson, J. exp. Biol. 114, 493 (1985). – [6] G. Fischer (Hrsg.): Daedalus – die Erfindung der Gegenwart. Verlag Stroemfeld, Roter Stern, Basel/Frankfurt a. M. 1990. – [7] G. Neumann, Z. f. Sportmedizin 51, 1609 (2000). – [8] W. Send, ZAMM 72, 113 (1992). – [9] http://www.aniprop.de/dpg96_vortrag_send.pdf. – [10] Fluid-Struktur-Wechselwirkung, VDI-Bericht 1682. Düsseldorf 2002. – [11] K. Herzog: Anatomie und Flugbiologie der Vögel. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1968. – [12] http://www.aniprop.de/aniprop_physik.html. – [13] W. Send, F. Scharstein: Artificial Bird in Tethered Flight – Demonstration and Aerodynamics. Biona Report 13, 195. Jena 1998. – [14] http://www.aniprop.de/natrs03_xlsmodell_send.html. – [15] F.O. Lehmann, Naturw. Rdsch. 53, 223 (2000). – [16] O. Lilienthal: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Berlin 1889. – [17] M. Wortmann: Rollmoment, Auftrieb und Vortrieb in Abhängigkeit einer Vielzahl aerodynamisch relevanter Parameter der Flügelbewegungen der Wüstenheuschrecken. Diss. Univ. Göttingen, Zool. Inst., 1991.

Dr. Wolfgang Send (geb. 20. Oktober 1944), Mitarbeiter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) seit 1976. Arbeitsgebiet Strömungsmechanik mit dem Schwerpunkt Aerodynamik und Strukturen (theoretische Begleitung der Airbus-Entwicklung in verschiedenen Projekten). Als Nebentätigkeit Vorlesungen zur Aerodynamik des Tierflugs an der Universität Göttingen seit 1988.

DLR-Institut für Aeroelastik, Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen.
wolfgang.send@dlr.de