

# Ikarus' Traum und die aerodynamische Wirklichkeit

Von Hans Joachim Schlichting und Bernd Rodewald

## Einleitung

„Der Mensch ist kein Vogel / es wird nie ein Mensch fliegen“ läßt *Brecht* (1967) den Bischof in seinem Gedicht „Der Schneider von Ulm“ sagen. Diese Aussage ist auch heute noch richtig - jedenfalls, wenn man den Flug aus eigenem Antrieb meint. Wir wollen im folgenden die physikalischen Gründe hierfür erörtern und dabei ein einfaches Modell für den Vogelflug diskutieren. Insbesondere soll untersucht werden, wie es den Fliegern gelingt, die jede Bewegung hemmende Luft sozusagen zur Voraussetzung des Fliegens zu machen. Dabei geht es insbesondere um die Frage, warum dieses kleinen Tieren leichter gelingt als großen und welche physikalischen Prinzipien dafür verantwortlich sind, daß ab einer bestimmten Größe Fliegen aus eigenem Antrieb nicht mehr möglich ist. Mit der Absicht einer möglichst einfachen Darstellung werden wir von den Details der Vortriebszeugung durch Flügelschlag absehen, die für den Vogelflug zwar wichtig, für ein prinzipielles Verständnis des Fliegens aber entbehrlich sind. Damit können wir den Auftriebsmechanismus getrennt vom Vortriebsmechanismus behandeln und von ähnlichen einfachen Verhältnissen wie beim Flugzeug ausgehen, welches gleichsam als Modell für ein fliegendes Tier angesehen werden kann. Historisch gesehen hat der Mensch das Fliegen allerdings von den Vögeln gelernt. Das erste technisch-physikalische Werk über das Fliegen mit dem vielsagenden Titel „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ (1889) stammt von dem Flugzeugpionier *Otto Lilienthal* der sein Wissen über das Fliegen vor allem durch eine systematische Beobachtung der Vögel erwarb.

## Die Luft hat keine Balken

Ein Tier, das sich in die Lüfte erheben will, muß dafür sorgen, daß es eine genügend große Auftriebskraft  $\vec{F}_A$  aufbringt, um die eigene Gewichtskraft  $\vec{F}_G$  zu überwinden:

$$F_A > F_G^1 \quad (1)$$

Dem eigenen Körper eine Kraft zu erteilen, ist erfahrungsgemäß jedoch nur möglich, wenn man mit einem anderen Körper in Wechselwirkung tritt. Man muß sich - anschaulich gesprochen von irgend etwas - abstoßen können. Physikalisch gesehen bekommt ein fliegendes Tier die Tücke des dritten *newtonschen* Axioms zu spüren: Was einem springenden Tier offenbar keine Schwierigkeiten bereitet, eine Kraft auf den harten Boden auszuüben, um sich von der gleichgroßen Gegenkraft wenigstens für die Zeitdauer eines Sprungs „hochheben“ zu lassen, erscheint für ein fliegendes, nur von der Luft umgebenes Tier auf den ersten Blick als ein unlösbares Problem. Denn Luft hat keine Balken, von denen es sich abstoßen könnte. Sieht man jedoch einen Vogel elegant und scheinbar ohne Mühe seine Kreise ziehen, so ist von Problemen offenbar keine Spur. Worin besteht der Trick der Vögel und anderer Flieger, sich von der Luft tragen zu lassen?

Aus Erfahrung weiß man, daß Luft „hart“ oder „steif“ werden kann. Hält man beispielsweise eine Hand ~s dem Fester eines schnell fahrenden Autos, dann spürt man förmlich die „Härte“ der Luft. Insbesondere dann, wenn man die Hand nicht genau parallel zur Fahrbahn sondern z. B. schräg nach oben gegen die Luftströmung geneigt ausrichtet, wird sie förmlich nach oben weggerissen. Die Luft ist offenbar umso „steifer“, je schneller man sich relativ zur Luft bewegt; und die Kraft, mit der man sich von der Luft abstoßen kann, wächst mit dieser „Steifheit“.

Diese Beobachtung wird durch Erfahrungen beim Drachensteigen erhärtet. Der Drache bleibt nur dann in der Luft, wenn man bei genügend starkem Wind die Schnur festhält oder bei schwachem Wind den Drachen genügend schnell hinter sich herzieht. Wesentlich ist offenbar die Relativge-

---

<sup>1</sup> Im folgenden werden Beträge von Vektoren durch Weglassen der Vektorpfeile hervorgehoben.

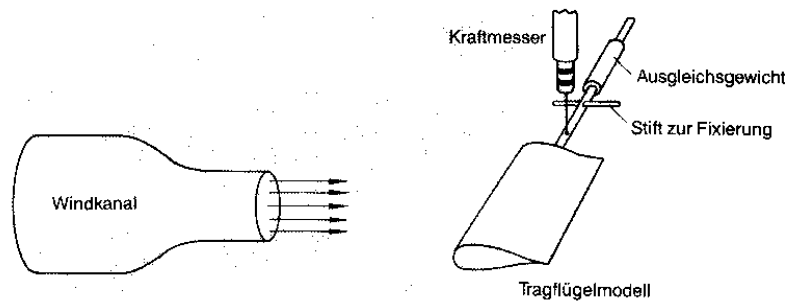


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Untersuchung des aerodynamischen Auftriebs

schwindigkeit zwischen Luft und fliegendem Objekt. Einer, der es wissen muß, der Pilot und Schriftsteller *Saint-Exupéry* hat die mit wachsender Geschwindigkeit sich einstellende Tragfähigkeit der Luft beim Start eines Flugzeugs einmal folgendermaßen umschrieben. „Der Pilot prüft die Luft, die anfangs dünn ist, dann fließend wird, endlich fest genug, er stützt sich an ihr empor und steigt“ (zitiert nach *Mann* 1981, S.103).

## Flugkörper im Windkanal

### Der dynamische Auftrieb

Wir wollen uns mit diesen qualitativen Vorüberlegungen nicht zufriedengeben. Uns interessiert insbesondere, ob man die Abhängigkeit der Auftriebskraft  $\vec{F}_A$  von der Relativgeschwindigkeit  $\vec{v}$  zwischen Luftstrom und Flugkörper nicht genauer bestimmen kann. Darüber hinaus wollen wir ermitteln, wie  $\vec{F}_A$  von der Flügel bzw. Tragfläche  $A_F$  (siehe Abb. 1) und der Form des Flugkörpers abhängt. Dazu führen wir folgenden Versuch durch:

Wir benutzen einen Windkanal,<sup>2</sup> mit dem sich Luftströmungen definierter Geschwindigkeiten erzeugen lassen. In den Luftstrom werden verschiedene Körper

(z. B. ein flaches Blech, ein gewölbtes Blech, ein Tragflügelabschnitt) in verschiedenen Anstellwinkeln  $\alpha$  gehalten ( $\alpha$  ist der Winkel zwischen der Richtung der anströmenden Luft und einer die Orientierung des Tragflügels beschreibenden Sehne) (siehe Abb. 2). Mit einer Federwaage werden

die jeweils hervorgerufenen Auftriebskräfte gemessen. Dazu wird der jeweilige Körper beispielsweise mit Hilfe einer horizontal ausgerichteten Drehachse so gelagert, daß er sich nur vertikal, nicht aber horizontal bewegen kann (siehe Abb. 1). Aufgrund dieser Versuchsreihen lassen sich folgende Ergebnisse erzielen:

- Die Größe der Auftriebskraft wächst mit der Größe der Anströmgeschwindigkeit  $v$ ; genauer:  $F_A \sim v^2$ .
- Je größer bei einer bestimmten Form die Flügelfläche  $A_F$  des Körpers ist, desto größer ist der Auftrieb; genauer:  $F_A \sim A_F$  (Dieses erkennt man besonders deutlich beim Vergleich verschieden großer ebener Flächen.)
- Die Größe von  $F_A$  hängt von dem sog. Anstellwinkel  $\alpha$  ab:  $F_A$  wächst zunächst, um dann bei sehr großen Werten von  $\alpha$  wieder zu fallen.
- Die Größe des Auftriebs hängt von der Form des umströmten Körpers ab.

Durch diese Aussagen wird folgende einfache Deutung nahegelegt: Der Luftstrom, der auf die schräg angestellte Fläche des Flugkörpers trifft, wird nach unten abgelenkt. Die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  wird auf diese Weise (in ihrer Richtung) um  $\Delta\vec{v}$  geändert, was (gemäß dem ersten newtonschen Axiom [Trägheitssatz]) einer Beschleunigung  $\Delta\vec{v}/\Delta t$  entspricht. Die Richtungsänderung des Luftstroms kann man sich mit Hilfe einer Fadensonde veranschaulichen: Die in dem Luftstrom vor dem Objekt horizontal ausgerichteten Fäden zeigen hinter dem Objekt einen schräg nach unten gerichteten Luftstrom an. Während der Zeitspanne  $\Delta t$  wird eine Luftsäule der Länge  $\Delta l = v \cdot \Delta t$  und einem der Flügelfläche  $A_F$  proportionalen Querschnitt  $A_F'$  abgelenkt. Dem entspricht eine Masse  $\Delta m = \rho \cdot A_F' \cdot v \cdot \Delta t$  ( $\rho$  = Dichte der Luft), die umso größer ist, je schneller die Luft strömt. Das „Steifwerden“ der Luft, von dem wir oben sprachen, bekommt auf diese Weise die anschauliche

<sup>2</sup> Man kann auch einen Fön benutzen. Die Strömungsgeschwindigkeit kann z.B. über eine Potentiometerschaltung variiert und mit einem Windmesser geeicht werden. Die Versuchskörper sollten jedoch kleiner als der Querschnitt des Luftstroms sein.

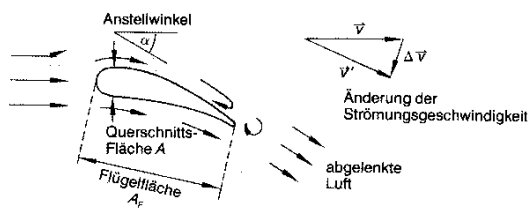


Abb. 2 Schematisierte Darstellung der Beschleunigung der ausströmenden Luft um  $\Delta \vec{v} / \Delta t$  durch den Tragflügel

Bedeutung einer größeren Massenbelegung des pro Zeiteinheit  $\Delta t$  abgelenkten Luftstroms und damit (gemäß dem zweiten *newtonschen* Axiom) einer größeren Krafteinwirkung auf den Luftstrom. Eine gleich große aber entgegengesetzt gerichtete Kraft wirkt (gemäß dem dritten *newtonschen* Axiom) auf den Körper zurück und macht sich im erwünschten Auftrieb

$$F_A = \Delta m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A'_F \cdot v \cdot \Delta v \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2} \rho C_A \cdot A_F \cdot v^2$$

bemerkbar. Beim letzten Gleichheitszeichen haben wir zum einen von der Proportionalität  $\Delta v \sim v$  (Strahlensatz! siehe Abb. 2) Gebrauch gemacht und zum anderen durch Einführung des Faktors  $1/2 \cdot C_A$  die Tatsache berücksichtigt, daß wegen der im obigen Versuch festgestellten Abhängigkeit der Auftriebskraft von der Form des Flugkörpers und den Anstellwinkel nur eine von der geometrischen Flügelfläche  $A_F$  verschiedene effektive Fläche  $A'_F = \frac{1}{2} C_A A$  in Rechnung gestellt werden darf.

### Der Luftwiderstand

Ein genügend schneller Luftstrom wird aber nicht nur zum „tragenden Balken“ eines Fliegers, sondern stellt dem Flieger ebenso einen Widerstand entgegen. Dies ist nicht nur typisch für Flugkörper, sondern für alle sich in einem Medium fortbewegenden Gegenstand. Jeder Radfahrer, der etwas schneller fahren möchte oder mit Gegenwind fertig werden muß, aber auch ein Autofahrer, der sich nach einer Fahrt bei hohen Geschwindigkeiten über den hohen Energieverbrauch wundert, hat einschlägige Erfahrungen mit dem Luftwiderstand gemacht. Die Abhängigkeit der Luftwiderstandskraft  $F_W$  von den verschiedenen Einflußfaktoren wie Querschnittsfläche, Form und Strömungsge-

windigkeit, läßt sich ebenfalls mit Hilfe des oben beschriebenen Versuchsaufbaus untersuchen, wenn man den umströmten Körper so lagert, daß er sich nur horizontal bewegen kann und dementsprechend die in horizontaler Richtung wirkende Kraft mißt. Man kann auf diese Weise zu folgenden Ergebnissen gelangen:

- Die Größe der Widerstandskraft  $F_W$  wächst mit der Größe der Anströmgeschwindigkeit  $v$ ; genauer:  $F_W \sim v^2$ .
- Je größer bei einer bestimmten Form die Querschnittsfläche  $A$  (siehe Abb. 2) des Körpers, desto größer ist der Widerstand; genauer:  $F_W \sim A$
- Die Größe des Widerstands hängt von der Form des umströmten Körpers ab.  $F_W$  ist besonders klein bei sog. Stromlinienformen.

Auch diese Ergebnisse erlauben eine einfache Modellierung, die - da sie der Modellierung des Auftriebs formal ähnlich ist - nur kurz skizziert werden muß: Der sich mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  durch die Luft bewegende Körper bzw. der von der Luft mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  angeströmte Körper bremst die Luft um  $\Delta v'$  ab und bewirkt damit eine Beschleunigung  $\Delta \vec{v} / \Delta t$  der Luft. In der Zeitspanne  $\Delta t$  übt daher der Körper mit einer zur Querschnittsfläche  $A$  proportionalen Fläche  $A' = \frac{1}{2} C_w A$  auf eine Luftsäule der Länge  $\Delta l = v \cdot \Delta t$  und der Masse  $\Delta m = \rho \cdot A' \cdot \Delta t$  eine Kraft aus. Diese ruft (gemäß dem dritten *newtonschen* Axiom) eine gleich große aber entgegengesetzt gerichtete Widerstandskraft vom Betrage

$$F_W = \frac{\Delta m \cdot \Delta v'}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho C_w A v^2 \quad (3)$$

hervor, die auf den Körper zurückwirkt. Daß nicht der gesamte Querschnitt  $A$ , sondern nur  $A' = \frac{1}{2} C_w A$  wirksam ist, hängt vor allem von der Form des Körpers ab.  $C_w$  nennt man Widerstandsbeiwert. Durch den bewegten Körper wird die Luft zur Seite gedrängt, um schließlich das hinter dem Körper entstehende „Loch“ wieder „aufzufüllen“. Dabei wird der Luft vom Körper Bewegungsenergie übertragen, die bei der Wiedervereinigung hinter dem Körper jedoch nicht wieder zurückübertragen wird. Stattdessen entstehen in der Luft Wirbel, die aufgrund der inneren Reibung allmählich wieder zur Ruhe kommen und dabei ihre Bewegungsenergie dissipieren. Dieser Sachverhalt ist letztlich verantwortlich dafür, daß bei der Fortbewegung in einem Medium Energie

verbraucht wird. Daher bemühen sich beispielsweise die Autohersteller intensiv, die Wirbelbildung möglichst gering zu halten. Da einer Verkleinerung der Querschnittsfläche Grenzen gesetzt sind, geht es gemäß Gl. (3) formal darum, durch angemessene Formgebung den  $C_w$ -Wert zu verkleinern. Flugzeughersteller können dieses Ziel allerdings nur unter der wesentlichen Nebenbedingung verfolgen, dadurch möglichst nicht den  $C_A$ -Wert zu verringern. Man hat es hier mit einer Optimierung zu tun zwischen dem Interesse, gleichzeitig einen großen Auftrieb und kleinen Widerstand zu verwirklichen.

Eine genauere Betrachtung der Strömungsverhältnisse am Tragflügel mit Hilfe der Fadensonde zeigt, daß auf dessen Oberseite die Fäden etwas zur Flügelmitte und auf dessen Unterseite etwas zum Flügelende gedrängt werden, was den Schluß zuläßt, daß eine Luftströmung über das Flügelenende von der Unterseite zur Oberseite auftritt. Dies ist als Folge der Tatsache anzusehen, daß aufgrund des Auftriebs unterhalb des Flügels ein Überdruck und oberhalb des Flügels ein Unterdruck auftritt, der zum Entstehen von entsprechenden Ausgleichsströmungen führt. Diese leicht zu übersehenden Randwirbel müssen deshalb berücksichtigt werden, weil sie zusätzlich Widerstand leisten und damit energetisch zu Buche schlagen. Dieser sog. induzierte Widerstand  $\vec{F}_I$  ist offenbar umso größer je kleiner die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  ist. Denn bei kleinen Geschwindigkeiten muß der Luftstrom sehr stark nach unten abgelenkt werden, wenn die Auftriebskraft  $\vec{F}_A$  nicht abnehmen soll. Das heißt aber, daß der Druckunterschied zwischen Flügelober- und -unterseite besonders groß wird und besonders starke Ausgleichswirbel entsprechend einem großen  $\vec{F}_I$  zur Folge hat. Quantitativ wird dieser Sachverhalt durch die Formel

$$F_I = \frac{(mg)^2}{2rA_F \cdot v^2} \cdot \frac{b}{l}$$

beschrieben. Dabei ist  $mg$  die durch die Auftriebskraft zu überwindende Gewichtskraft und  $b/l$  das Verhältnis aus Flügelbreite  $b$  und Länge  $l$  (vgl. z. B. *Alexander* 1983, S. 152).

In unserem einfachen Modell haben wir damit die auf den Flügel wirkende Kraft in drei Anteile zerlegt:

- die Auftriebskraft  $\vec{F}_A$ ,
- die Luftwiderstandskraft  $\vec{F}_W$  und

- den induzierten Widerstand  $\vec{F}_I$ .

Während die beiden letzteren als Folge einer durch die Fortbewegung bedingten Verwirbelung der Luft angesehen wurden und daher mit einer entsprechenden Dissipation von Energie verbunden sind, wurde unterstellt, daß erstere lediglich durch eine dissipationsfreie Ablenkung des Luftstroms zustande kam. Eine solche Zerlegung ist natürlich künstlich, aber für die Beschreibung nützlich. Beobachtbar ist jedoch nur die Wirkung der gesamten am Flügel angreifenden Kraft.

### Große Flieger haben es schwer

Ein gegebener Flieger mit einer Flügelfläche  $A$  kann gemäß Formel (2) den Auftrieb entweder dadurch vergrößern, daß er durch Änderung des Anstellwinkels die Luft stärker nach unten ablenkt (was sich in einem größeren  $C_A$ -Wert bemerkbar macht) oder dadurch, daß er die Geschwindigkeit erhöht. Der ersten Möglichkeit sind gemäß der oben gewonnenen experimentellen Ergebnisse Grenzen gesetzt. Deshalb ist eine Erhöhung der Geschwindigkeit  $v$  das entscheidende Mittel zur Vergrößerung des Auftriebs. Um die Flugbedingung (1) zu erfüllen, muß daher die Mindestgeschwindigkeit

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{mg}{A_F} \cdot \frac{2}{rC_A}} \quad (4)$$

vom Flieger aufgebracht werden. Diese ist offenbar umso geringer, je kleiner die den Flieger kennzeichnende Flächenbelastung

$$Q = \frac{mg}{A_F} \quad (5)$$

ist

Man kann näherungsweise davon ausgehen, daß die meisten vogelartigen Flieger vom Jumbojet über die Papierschwabe bis zur Mücke geometrisch ähnlich sind.

Normalerweise ist die Fläche  $A$  (Querschnitt, Oberfläche) eines Körpers der Länge  $L$  proportional zu  $L^2$  und das Volumen  $V$  proportional zu  $L^3$  mit Vor den jeweiligen Körper charakteristischen Proportionalitätskonstanten. Körper sind dann geometrisch ähnlich, wenn sie jeweils dieselbe Proportionalitätskonstante besitzen, so daß für sie ganz allgemein gilt:  $A \sim L^2$  und  $V \sim L^3$ . Unterstellt man außerdem dieselbe Dichte, was zumindest für alle Tiere eine gute Näherung darstellt, dann gilt außerdem:  $m \sim V$ .

Für die Flächenbelastung  $Q$  ähnlicher Flieger folgt demnach,

$$Q = \frac{L^3}{L^2} = L \sim m^{1/3}.$$

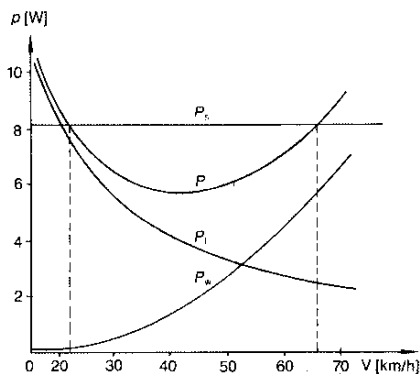
M. a. W.: Die Flächenbelastung wächst mit der Größe  $L$  bzw. Masse  $m$  des Fliegers. Große Flieger haben es daher insofern schwerer als kleine, als sie, um die Flächenbelastung aufrechterhalten zu können, einen größeren Auftrieb pro Fläche und damit pro kg Körpermasse eine größere Muskelkraft aufzubringen haben. Darüber hinaus benötigen sie gemäß Gl. (4) eine höhere Mindestgeschwindigkeit.

$$v_{\min} \sim L^{1/2} \sim m^{1/6}.$$

Sie müssen also beispielsweise mit einer größeren Geschwindigkeit starten, was ihnen ab einer bestimmten Größe nicht mehr aus dem Stand, sondern erst nach einem mehr oder weniger langen Anlauf gelingt. Dies gilt erst recht für Flugzeuge deren Start durch relativ lange Beschleunigungsstrecken gekennzeichnet ist.

*Beispiel:*

Aus der Information, daß eine 400 g schwere Taube mindestens mit einer Geschwindigkeit  $v_{\min} = 22$  km/h fliegen muß (McMahon et al. 1985, S. 145), läßt sich die Proportionalitätskonstante in Gl. (7) berechnen. Damit kann man abschätzen, daß beispielsweise 1 g schwere Insekten mit einer Mindestgeschwindigkeit von etwa 2,3 m/s fliegen müssen. Messungen ergaben 4 m/s als Durchschnittsgeschwindigkeit (Lighthill 1977, S. 257), was als Bestätigung für unserer Abschätzung angesehen werden kann. Für einen Jumbojet von 50 t Masse schätzt man auf die selbe Weise eine



**Abb. 3:** Grafische Darstellung der Leistungsbilanz einer Taube (nach McMahon et al. 1985). Die Leistung  $P_w$  und  $P_f$  addieren sich zur Gesamtleistung  $P$ . Nur im Geschwindigkeitsbereich zwischen 22 km/h und 62 km/h ist  $P$  kleiner als die vom Vogel aufbringbare Leistung  $P_s$  aufgrund des Stoffwechsels.

Mindestgeschwindigkeit von 160 km/h ab, was ebenfalls größenordnungsmäßig zutrifft.

Welche Leistung erfordert das Fliegen?

Nach den obigen Modellvorstellungen tragen nur  $F_w$  und  $F_l$  zum Energieverbrauch bei. Sie erfordern eine Leistung

$$P = (F_w + F_l) \cdot v = \frac{1}{2} r C_w A_F v^3 + \frac{m^2 g^2 b}{2 r A_F v l} \quad (8)$$

Die stark unterschiedliche Abhängigkeit der beiden Summanden von der Geschwindigkeit weist auf ein deutliches Leistungsminimum hin bei einer mittleren Geschwindigkeit

$$v_{opt} = \sqrt[4]{Q \left( \frac{2b}{3l} \cdot \frac{1}{r C_w} \right)} \quad (9)$$

(Extremwertberechnung!), mit der zu fliegen es energetisch am günstigsten ist (siehe Abb. 3). Setzt man  $v_{opt}$  in Gl. (8) ein, so erhält man die optimale Leistung  $P_{opt}$ . Berücksichtigt man, daß für ähnliche Flieger  $v_{opt} \sim L^{1/2}$ ,  $m \sim L^3$  und  $A \sim L^2$  (s. o.), so ergibt sich  $P_{opt} \sim L^{7/2} \sim m^{7/6} \approx m^{1,16}$ .

Die optimale Leistung wächst daher nahezu proportional mit der Körpermasse eines Fliegers. Demgegenüber wächst die Leistung  $P_s$  die durch den Stoffwechsel der Tiere bereitgestellt werden kann nur mit  $m^{3/4}$  (siehe z. B. Lin 1982):

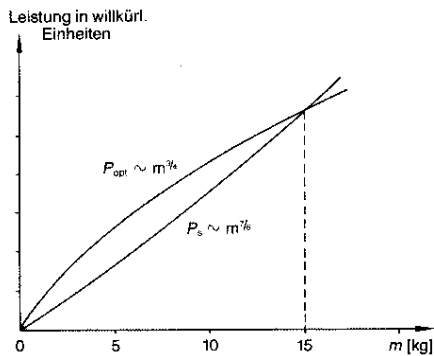
$$P_s \sim m^{3/4} \quad (10)$$

Vögel, bzw. allgemein aus eigener Kraft fliegende Lebewesen, gibt es daher nur unterhalb einer bestimmten maximalen Körpermasse. Oberhalb dieser Masse wäre zur Aufrechterhaltung des Flugs eine größere Leistung erforderlich als dem Tier durch seinen Stoffwechsel zur Verfügung steht (siehe Abb. 4). Diese maximale Masse liegt bei etwa 15 kg. Vögel, die dieser Masse nahekommen, wie beispielsweise der Albatros, fliegen ständig an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit und nutzen wenn irgend möglich energiesparende Flugtechniken

<sup>3</sup> Diese Beziehung läßt sich mit dem Hinweis darauf plausibel machen, daß der größte Energieverlust des Körpers durch die Oberfläche geht, welche wegen  $m \sim A^{2/3}$  für große Tiere weniger ins Gewicht fällt als für kleine. Daher wächst der Energieverbrauch weniger als proportional mit der Masse was durch Gl. (10) ausgedrückt wird.

aus wie etwa den Segelflug oder Gleitflug bei Thermik oder Hangabwinden.

Neben dieser Obergrenze gibt es auch eine Untergrenze. Sehr kleine Flieger, z. B. kleine Insekten, haben wegen Gl. (6) nur eine kleine Flächenbelastung, aufgrund derer sie leicht zum Spielball von Winden und anderen Luftdruckschwankungen



**Abb. 4:** Die zum Fliegen erforderliche optimale Leistung  $P_{opt}$  wächst schneller mit der Masse  $m$  als die vom Vogel aufbringbare Leistung  $P_s$ . Damit ergibt sich eine obere Grenze der Flugmasse bei etwa 15 kg

werden können.

## Der fliegende Mensch

Die energetisch bedingte Massenbegrenzung für Vögel zeigt, daß der Mensch auch dann nicht (aus eigener Kraft) fliegen könnte, wenn er ähnlich wie ein Vogel gebaut wäre. Dieses Unvermögen wird durch zahlreiche Versuche von Ikarus über den Schneider von Ulm bis in die jüngste Zeit bestätigt. Eine weitere Möglichkeit, sich die Unfähigkeit zu fliegen vor Augen zu führen, besteht darin, die Mindestgeschwindigkeit abzuschätzen, die man aufbringen müßte. Gemäß Gl. (7) verhalten sich die Mindestgeschwindigkeiten von vogelähnlichen Fliegern wie die sechsten Wurzeln ihrer Massen. Aus der Kenntnis, daß eine  $m_T = 0,4$  kg schwere Taube mindestens mit  $v_T = 22$  km/h fliegen muß, ergibt sich dann, daß ein  $m_M = 75$  kg schwerer Mensch mindestens eine Geschwindigkeit

$$v_M = v_T \cdot \frac{m_M}{m_T} \approx 53 \text{ km/h}$$

erreichen müßte. Das ist selbst für kürzeste Zeitspannen völlig unmöglich (vgl. Schlichting 1983, S. 133). Sprinter beispielsweise erreichen für wenige Sekunden allenfalls 36 km/h.

Daß es dennoch im Jahre 1979 dem Drachenflieger Bryan Allen gelungen ist, zwar mit technischen Hilfsmitteln, aber aus eigener Kraft den 36 km breiten Ärmelkanal in zwei Stunden 49 Minuten zu ü-

berqueren, ist vor allem dem Umstand zu verdanken, daß er mit seinem Fluggerät einen anomalen Vogel darstellte (vgl. Mann 1981, S. 104f). Allen benutzte ein nur 25 kg schweres Fluggerät, mit dem zusammen er  $m = 87$  kg wog, obwohl es über eine enorme Flügelfläche von  $A_F = 72 \text{ m}^2$  verfügte. Bewegt wurde das Fluggerät über den als energetisch äußerst günstig bekannten Pedalantrieb (vgl. Schlichting 1983, S. 136ff). Mit einer so großen Flügelfläche wird eine äußerst geringe Flächenbelastung (Gl. (5)) erreicht, die mit

$$Q = mg/A_F = 11,8 \text{ N/m}^2$$

der eines Kolibris vergleichbar ist.

Daraus ermittelt man gemäß Gl. (4) eine Mindestgeschwindigkeit von

$$v_{min} = \sqrt{Q \cdot \frac{2}{\rho C_A}} = 12,2 \text{ km/h},$$

wenn man  $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$  und  $C_A = 1,6$  zugrundelegt.

Bei der Berechnung von  $C_A$  wurde die Kenntnis der Gleitzahl  $\epsilon = F_W/F_A = 0,05$  (Mann a. a. o.) ausgenutzt. Gemäß Gl. (2) und (3) ermittelt man damit  $C_A = 20 C_W/A_F$ . Aufgrund einer photographischen Vorlage schätzen wir, daß die Flügel einen Querschnitt von im Schnitt 20 cm Stärke also  $5,8 \text{ m}^2$  und die Fahrerkanzel etwa einen Querschnitt von  $1,5 \text{ m}^2$  besitzen, legt man wegen des relativ weitläufigen Aufbaus außerdem den  $C_W$ -Wert eines Radrennfahrers von etwa 0,8 zugrunde dann ergibt sich  $C_A \approx 1,6$ .

$v_{min}$  liegt nur wenig unter der von Allen tatsächlich geflogenen Geschwindigkeit von 12,8 km/h. Wenn unsere Abschätzungen vernünftig sind, bedeutet dies, daß Allen haarscharf über der Grenze der Mindestgeschwindigkeit geflogen sein muß. Denn er hatte keine Energie zu verschenken, wie man sieht, wenn man gemäß Gl. (8) eine erforderliche Leistung von ca. 260 W ausrechnet. Obwohl dieser Wert selbst für einen trainierten Menschen wie Allen im Schnitt wohl nicht erreichbar war, dürfte der wahre Wert nicht weit darunter gelegen haben. Dem Allenschen Flug kommt über den sportlichen Aspekt hinaus wohl keine praktische Bedeutung zu, denn die anomal kleine Flächenbelastung erlebt einen einigermaßen kontrollierbaren Flug nur bei Windstille weil ansonsten die Luftdruckschwankungen von derselben Größenordnung wie die Flächenbelastung sind.

## Literatur

[1] Alexander, R. M.: Locomotion of Animals. Glasgow, London: Blackie 1983.

[2] *Brecht, B.*: Gesammelte Werke 9. Frankfurt 1967, S. 645.

[3] *Lighthill, J.*: Introduction to the scaling of aeral locomotion. In: T. J. Pedley (ED.) Scale effects in animal locomotion. New York, London: Academic Press 1977.

[4] *Lilienthal O.*: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Berlin: Gaertners 1889. Z. Zt. als Reprint bei Harenberg, Dortmund 1982 erhältlich.

[5] *Lin, H.*: Fundamentals of zoological scaling, Am. J. Phys. 50/1, 72 (1982).

[6] *McMahon Th. A. und Bonner J. T.*: Form und Leben. Heidelberg: Spektrum 1985.

[7] *Mann, A.*: Hermeneutische Physik oder: zweierlei theoretische Physik an der Universität, phys. did, 8/2, 99 (1981).

[8] *Schlichting, H.J.*: Energie und Energieentwertung. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983.