Erich von Holst

Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen

Gesammelte Abhandlungen
Band II

ISBN 3 492 01784 3
Titelnummer 1784
© R. Piper & Co. Verlag, München 1970
piper paperback

Über »künstliche Vögel« als Mittel zum Studium des Vogelflugs

(1943)

veröffentlilcht in:
Journal für Ornithologie Ausgabe 91, Seite 406–447 (1943)

Einleitung

Ein guter Ornithologe ist immer auch ein guter Kenner des Vogelfluges insofern, als er die Besonderheiten jedes Flugtypus und möglicherweise auch noch deren Zusammenhänge mit Bau und Lebensweise sicher »im Gefühl« hat. Ob er darüber hinaus noch Veranlassung hat, sich wissenschaftlich – d. h. in exakter Form und in aerodynamisch einwandfreier Denkweise – mit dem Vogelflug, dieser Königin aller Bewegungsarten, zu befassen, darüber läßt sich streiten. Die moderne Aerodynamik, ein im Dienste unserer Flugtechnik hochentwickeltes Denkgebäude, das in jüngster Zeit versucht, sich auch des Schwingenflugproblems zu bemächtigen, liegt den Biologen naturgemäß fern (leider meist auch denen, die Bücher über den Vogelflug schreiben), und viele, die den Vogelflug als Quelle hoher ästhetischer Genüsse betrachten, mögen sich darin durch allzuviel formelbelastetes Einzelwissen gestört fühlen. Aus dem gleichen Grunde werden solche Biologen auch geneigt sein, von vornherein jeden Versuch einer »Technisierung« des Tierflugs, der die lebendige Eleganz dieser Bewegung in starr-mechanische Formen pressen wollte, grundsätzlich abzulehnen. Das eine wie das andere sind jedoch Vorurteile: Die experimentelle und theoretische Beschäftigung mit der tierischen Flugtechnik nämlich und das Wissen um Einzelheiten und Zusammenhänge ist nur geeignet, die Augen zu schärfen und, wie der Verfasser (in 15jähriger Tätigkeit) an sich selber erfahren hat, den ästhetischen Genuß zu steigern – so wie die Kenntnis des Aufbaus Bachscher Fugen den reinen Kunstgenuß auch des musikalischen Hörers noch vertieft. Und was das Problem: Hie lebendige Schönheit, hie starre tote Mechanik! anlangt, so läßt sich nirgends besser als gerade hier zeigen, daß das *ästhetisch Schöne* der tierischen Bewegung *gar nichts anderes* ist als *vollkommenste, ideal angepaßte Mechanik* und daß gerade jener Eindruck lebendiger Schönheit von

einem toten Flugmodell dann in hohem Maße ausgeht, wenn es technisch-aerodynamisch einwandfrei fliegt, während jegliche Fehler und Mängel es sofort maschinenmäßig starr und leblos erscheinen lassen. Es ist daher für den Erbauer künstlicher Vögel größtes Lob, wenn kritische Betrachter sich (nicht etwa über Fragen des Getriebes, der Energiequelle usw., sondern) zuallererst über die Natürlichkeit und Lebendigkeit der Bewegung wundern.

Die allgemein-ästhetische Seite ist darum auch dem Experimentierenden so wichtig, weil immer zuerst der Eindruck: da ist noch irgend etwas Gezwungenes, Unelegantes, ihn auf Fehler und Störungen im Bewegungsablauf aufmerksam macht und ihn so zur »richtigen«, d. h. aerodynamisch besten und zugleich ökonomischsten Bewegung hinleitet, noch bevor er selbst weiß, wie eigentlich diese beste Bewegung auszusehen hat. Aus diesem Grunde ist es nur selbstverständlich, daß jüngst durchgeführte quantitative Messungen über die beim schwingenden Flügel auftretenden Luftkräfte und die zugehörigen benötigten Energien (v. Holst 1943 b) nur das im einzelnen deutlicher sichtbar und quantitativ angebbar machten, was im Prinzip auch schon die künstlichen Vögel mich seit Jahren gelehrt hatten.

Was für einen Sinn hat es nun, künstliche Vögel zu bauen und zu studieren, wo es doch lebende genug gibt, die es gewiß besser können? Die Frage ist nicht ganz so naiv, wie sie scheint: Es gibt in der Tat gewisse Dinge, die das Flugmodell nicht darstellen kann, vor allem den bei Vögeln sicher häufig vorkommenden nicht stabilen, sondern labilen, nur durch ständige unmerkliche Korrekturen vom Labyrinth her aufrechterhaltenen Gleichgewichtszustand (s. S. 123) und ferner besondere komplizierte Formen der Steuerung. Davon abgesehen aber läßt sich für so ziemlich alles, was man überhaupt zeigen oder untersuchen will, ein entsprechend eingerichtetes Modell verwenden. Die Mechanik der Bewegung in allen Einzelheiten und die Bedeutung jeder für sich variierbaren Bewegungskomponente, die Bedeutung von Flügelform, -elastizität, von Gewichtsverteilung und Flächenbelastung, der benötigte Kraftaufwand und die Kraftverteilung, ferner der Einfluß des noch zu besprechenden Fortschrittsgrades und der Reynoldsschen Kennzahl und schließlich die verschiedenen Formen der Steuerung und Stabilisierung, der Start- und Landehilfen usw. – all dieses sind am Modell experimentell zugängliche Dinge, an die man beim Vogel teils schwer, teils gar nicht heran kann. Dazu hat ein leicht gebautes Flugmodell noch den Vorteil, alle Bewegungen sehr viel langsamer und daher dem bloßen Auge viel deutlicher erkennbar vorzuführen, was besonders für große »Vögel« von 150–200 cm Spannweite gilt, die geradezu in Zeitlupentempo fliegen, so daß man für

alle bloß qualitativen Feststellungen im allgemeinen sich ganz auf das bloße Auge verlassen kann.

Das Entscheidende scheint mir jedoch, daß mit der Möglichkeit, hier Behauptetes auch wirklich darstellen zu können, dem bisherigen *bloßen Meinen* und *Theoretisieren* (und den beliebten allzu billigen Vergleichen und Rückschlüssen vom menschlichen Flugzeug her) grundsätzlich *ein Ende gemacht* ist. Wer in Zukunft ein Buch über Vogelflug oder neue Theorie über gewisse Flugformen, über die Bedeutung dieser oder jener Flügelstrukturen usw. schreiben will, von dem wird man verlangen können, daß er nicht nur über die Aerodynamik der Schwingenbewegung genügend unterrichtet, sondern auch in der Lage ist – hic Rhodos, hic salta –, seine neue Vorstellung im Modell ad oculos zu demonstrieren. Die Wissenschaft vom Tierfluge, die *Flugbiophysik* als ein Grenzgebiet zwischen Biologie, Aerodynamik und Technik, hat das Glück, mehr sein zu können als eine bloß papierene Theorie oder Formelsammlung, und damit die Pflicht, von dieser Möglichkeit intensiven Gebrauch zu machen. Wer für abstrakte mathematische Formulierungen keinen Sinn hat – und das klassische Beispiel von Lorenz' Arbeit (1933) über den Vogelflug zeigt, das gerade in diesem Lager sich hervorragende Beobachter mit feinstem physikalischen Fingerspitzengefühl befinden können – kann dieses Gebiet durch Modellversuche ebenso fördern wie durch Beobachtungen und Experimente am lebenden Objekt. Und eine Förderung durch gründliche und exakte experimentelle Arbeit ist sehr von Nöten. Nicht allein um des reinen Wissens willen um Probleme, über die die Menschheit seit vielen Jahrhunderten sich Gedanken macht, sondern auch darum, weil wir schon heute, nach dem was bisher vorliegt, erkennen können, daß die Flugbiophysik der künftigen Flugtechnik entscheidende Anregungen zu geben verspricht – zwar nicht in dem primitiven Sinne, daß das Schwingenflugzeug das Verkehrsmittel der Zukunft sein wird, wohl aber in einer andernorts ausführlicher diskutierten Art und Weise.

Die allgemeine Bedeutung dieses Gebietes und die Qualität des hier bisher Geleisteten stehen im allgemeinen freilich in einem beschämend ungünstigen Verhältnis. Bis in die neueste Zeit erscheinen immer noch Aufsätze und selbst dicke, vielgelesene Bücher von Autoren, die nur um ihrer Theorien (meist handelt es sich um die Idee des menschlichen Schwingenflugs mit Muskelkraft) willen gern die ganze Physik auf den Kopf stellen und die Aerodynamik als eine Art Irrlehre behandeln und denen es leider keineswegs an zahlreicher Anhängerschaft fehlt, die gern darüber hinwegsieht, daß der Autor nur darum selbst noch nicht fliegt, weil das Flugzeug oder Flugmodell

unglücklicherweise beim ersten Start zu Bruch ging oder weil ein wesentlicher Bauteil leider nicht zu beschaffen ist oder es im Augenblick an Geld fehlt usw.[1] Gegen solche papierene Phantasien ist gerade das Flugmodell, das u. a. auch über den oft unterschätzten Leistungsaufwand genauere Daten vermittelt, das gegebene, weil jedermann zwingende Überzeugungsmittel[2].

Der ursprüngliche *Plan dieses Aufsatzes*: zugleich mit der Beschreibung mehrerer bewährter Modelle auch eine Reihe von Ergebnissen über den Einfluß der Flügelform, Flächenbelastung und Reynoldsschen Zahl u. a. an Hand ausgewerteter Filme vorzulegen, ließ sich aus zeitbedingten Gründen nicht verwirklichen. Daher ist hier vorerst nur die Beschreibung von Bau und Handhabung zweier verhältnismäßig einfacher Modellkonstruktionen gebracht und anschließend das Wesentliche, was sich mit ihnen demonstrieren läßt, beschrieben. Mit Hilfe der hier vorgelegten Bauanleitung wird jeder, der einigermaßen geschickte und geduldige Hände hat – und die braucht der Biologe ja ohnehin – leicht weiterarbeiten und ihn interessierende Fragen untersuchen können. Vorkenntnisse im Modellbau sind im übrigen nicht erforderlich; (sie scheinen im Gegenteil nach eigenen Erfahrungen mit Flugmodellbauern, denen der Nachbau unserer »Vögel« mehr oder weniger vorbeigelang, nicht günstig, da sie den Betreffenden mit allerlei technischen Vorurteilen belasten). Um die Einzelheiten von Konstruktion und Bewegungsweise besser verständlich zu machen, mag eine ganz einfache summarische Darstellung einiger wesentlicher Gesichtspunkte aus der Aerodynamik der Schwingenbewegung voranstehen, die erforderlich erscheint, weil die vorhandene Literatur[3] einerseits nicht frei von Fehlern und Mißverständnissen ist und andererseits Wesentliches unbeachtet läßt, wodurch alles viel schwieriger erscheint, als es tatsächlich ist.

1 Ein Beispiel wäre etwa das Buch von H. Mascow ›Vom Vogelflug zum Menschenflug‹.

2 Seit der Verfasser 1940 auf einem Reichswettbewerb für Saalflugmodelle verschiedene »Vögel« und »Libellen« vorführte, über deren Erfolge durch die Presse des In- und Auslands (z. T. übertrieben) berichtet wurde, hat er eine Menge von Zuschriften mannigfacher Art erhalten, die zeigen, wie lebendig die Idee des menschlichen Schwingenflugs – trotz aller Flugtechnik – auch heute noch allenthalben ist; von Patentanpreisungen und Unterstützungsforderungen angeblich gleichlaufender Bestrebungen angefangen über mehr oder weniger naive »Erfindungen« und »Berechnungen« bis hinauf zu teils an gewisse Bedingungen geknüpften, teils aber völlig uneigennützigen, großzügigen Geldangeboten ist die ganze bunte Skala menschlicher Einstellungen zu diesem Problem hier vertreten.

3 Zu empfehlen ist R. Schmidts inhaltsreiches kleines Buch ›Flug und Flieger im

Aerodynamische Vorbemerkungen

Welche Beschaffenheit hat eigentlich die Luft für den fliegenden Vogel? Wir Menschen, als Bodentiere, haben dafür nur ein ganz unbestimmtes Gefühl. Der Unvoreingenommene denkt zunächst an die Kompressibilität der Gase und stellt sich etwa ein elastisches »Luftkissen« unter dem herabschlagenden Flügel oder dgl. vor. Das ist falsch: Die Zusammendrückbarkeit der Luft tritt im gesamten Gebiet des tierischen Fliegens (wesentlich unterhalb der Schallgeschwindigkeit) praktisch nirgends in Erscheinung; der Vogelflügel empfindet die Luft etwa wie unsere Hand beim Schwimmen das Wasser, natürlich mit dem Unterschied, daß jene ihn nicht von selbst trägt. Es ist gleichsam ein *äußerst leichtes Wasser,* in dem der Vogel fliegt, und so gilt für ihn, was auch jeder erfahrene Schwimmer weiß, daß eine wirksame und zugleich kraftsparende Bewegung ausholend, gleichmäßig und mit einem gewissen sanften Nachdruck, nicht aber plötzlich, hart und ruckartig sein muß (wie es nötig wäre, wollte man in einem großen gasgefüllten Raum eine lokale Kompression erzielen).

Genauer betrachtet, ist die Beschaffenheit dieser Flüssigkeit, durch die der Vogel sich fortbewegt, nicht immer die gleiche, richtiger: sie ist nicht für alle Vögel gleich, was daher kommt, daß *zwei verschiedene Eigenschaften* für ihre Rückwirkung auf den bewegten Flügel von Bedeutung sind. Die eine ist die *Massenträgheit* der einzelnen Flüssigkeits- (= Luft-) Teilchen, die zweite deren innere Reibung, die *Zähigkeit.* Daß die Massenträgheit wichtig ist, wo allenthalben Beschleunigungen auftreten, leuchtet ein; daß auch die Zähigkeit eine große Rolle spielt, wird deutlich, wenn man sich klar macht, daß der Flügeloberfläche eine ganz feine Flüssigkeitshaut – die »Grenz-« oder »Reibungsschicht« – gleichsam anhaftet, so daß die Bewegungsvorgänge tatsächlich zwischen Luftschichten verschiedener Geschwindigkeit vor sich gehen. Die Erfahrung lehrt nun, daß das Verhältnis von Trägheits- und Zähigkeitskräften nicht konstant ist, sondern wechselt: Mit Anwachsen der Geschwindigkeit und der Flächengröße nehmen die Trägheitskräfte, mit deren Absinken die Zähigkeitskräfte an Bedeutung zu. Diesen Zusammenhang drückt die *Reynoldssche Kennzahl* $Re = \varrho v l / \mu$ aus, wobei ϱ die Dichte, μ die Zähigkeit des Mediums, l ein der Fläche entnommenes Längenmaß

Pflanzen- und Tierreich« (1939). Der Beitrag über Vogelflug von Stolpe und Zimmer (1939) enthält physikalische und andere Mißverständnisse und Fehler und läßt wichtige Zusammenhänge außer acht.

(meist nimmt man die Flügelbreite = Flügeltiefe), v die Geschwindigkeit bedeutet.

Mit der Reynoldsschen Kennzahl sollte auch der Flugbiologe sich etwas befreunden, sie vermittelt ihm wichtige Erkenntnis und schützt ihn vor falschen Verallgemeinerungen[4]. Eine solche ist z. B. die Annahme, der flache, oft kantige, mit Borsten, Schuppen usw. versehene Insektenflügel sei dem schön gewölbten und geglätteten der großen Vögel aerodynamisch unterlegen. Denn tatsächlich brauchen die bei viel kleinerer Re-Zahl[5], d. h. in »zäherem« Medium fliegenden Insekten Kanten und Rauhigkeiten, die die laminar vorbeiströmende und sich leicht unter Bildung von »Totwasser« ablösende Strömung ein wenig turbulent machen, wodurch bessere Durchmischung und damit besseres Anliegen der Strömung am Flügel erreicht wird. Bei sehr kleinen Re-Zahlen erlaubt die Zähigkeit sogar eine Auflösung der Fläche in Reihen von Haaren (Federmotten u. a.), die, wie Messungen uns zeigten, immer noch erhebliche Luftkräfte in diesem »Sirup« erzeugen – es liegt auf der Hand, daß eine Übertragung solcher Flächen ins Große ein glattes Fiasko ergeben würde.

Turbulenzerzeugende Vorsprünge in Form von ausgezackten und aufgeschlissenen Federn kommen auch bei Eulen und Nachtschwalben vor, wo sie bekanntlich die besondere Aufgabe erfüllen, den Flug lautlos zu machen. Die ständigen örtlichen Turbulenzen behindern das Auftreten ausgedehnterer Schwingungen, die Ursache des Fluggeräusches sind. Auch dieses Verfahren ist an einen gewissen Bereich der Re-Zahlen gebunden; die Hoffnung, durch ähnliche Mittel im Großen geräuschlose Flugzeuge zu schaffen, läßt sich nicht erfüllen.

Nach diesen einleitenden Bemerkungen über die Beschaffenheit der Luft für den fliegenden Vogel können wir uns der Kernfrage unseres Problems zuwenden, dem eigentlichen sog. *»Rätsel des Vogelflugs«* – ein von Laien wie Technikern gern gebrauchter Ausdruck, der die stillschweigende Voraussetzung enthält, es läge hier irgendwo ein bestimmtes physikalisches Geheimnis verborgen, dessen Entschleierung erst die Nachahmung des Vogel-

4 Ein typisches Beispiel falscher Verallgemeinerung aus jüngster Zeit ist der von Flugtechnikern gemachte Versuch, die Feinstruktur der Vogelfeder zum Modell eines Flugzeugflügels zu nehmen, in der Hoffnung, irgendeinen bei der Feder vermuteten aerodynamischen Knalleffekt technisch auszunutzen.

5 Wesentlich unter 10 000; der Bussard fliegt etwa bei Re = 250 000, der Wanderfalke bei 500 000, unsere Flugzeuge bei Reynoldsschen Zahlen von mehreren Millionen.

flugs möglich machen würde. Indessen gibt es ein solches »Rätsel« gar nicht; wie so oft in der Biologie, löst sich auch hier das scheinbare Wunder in ein überaus vollkommenes Zusammenspiel einfacher Teilvorgänge auf. Das Hauptproblem des Lebens ist – was wenigstens hier, wo es sich offensichtlich um reine Physik handelt, auch jeder »Vitalist« wird zugeben müssen – das Problem des Zusammenspiels, der *Koordination*. Das komplizierte Ineinander der Faktoren ist an Hand quantitativer Untersuchungsreihen andernorts ausführlich und nach aerodynamischen Gesichtspunkten dargelegt (E. v. Holst 1943 b); für unsere hier verfolgten Zwecke wird eine sehr vereinfachte Darstellung genügen (die allerdings verschiedene tiefere Zusammenhänge nicht sichtbar machen kann).

Auf welche Weise kann ein bewegter *Flügel Luftkräfte erzeugen*? Offenbar auf sehr verschiedene, je nach Art der Bewegung. Grundsätzlich sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden: 1. Der Flügel wird mit der vollen Breitseite herab und, nach Drehung um 90°, mit der Vorderkante voran wieder hinauf bewegt; die Möglichkeit, an die der Unvoreingenommene zuerst denkt und auf der fast alle älteren Flugtheorien beruhen. Da der Flügel so beim Abschlag großen, beim Aufschlag geringen Widerstand hat, entsteht insgesamt eine Widerstandskraft nach oben, der Vogel *»fliegt mit dem Widerstand«*. Das Verfahren entspricht etwa dem Prinzip des Raddampfers; und ähnliche, durchaus ernsthafte Projekte gibt es auch für Flugzeuge, bei denen auf einem Radkranz bewegte Flächen (wenigstens bei Start und Landung) in dieser Weise das Gewicht tragen sollen.

Nun ist allerdings in der Lehre von den nichtperiodischen (stationären) Strömungen seit langem bekannt, daß dieses Prinzip mit einem schlechten Wirkungsgrad arbeitet; und eigene Messungen an schwingenden Flächen (v. Holst 1943 b) haben uns gezeigt, daß das gleiche auch für instationäre Strömung gilt. Das rührt daher, daß hinter dem von der Breitseite her (also im Winkel von 90° gegen die Fläche) angeblasenen Flügel die Strömung unter Bildung eines großen Wirbelgebietes »abreißt«. Die zur Erzeugung dieser Wirbel notwendige Arbeit hat der Flügel zu leisten, ohne daß er dafür eine entsprechend ausnutzbare Luftkraft einhandelt; denn die hineingesteckte kinetische Energie geht bei den sich durchmischenden und schließlich sich gegenseitig aufhebenden Wirbeln als Reibungswärme ungenutzt verloren. Das »Fliegen mit dem Widerstand« kommt daher in der Natur auch nur ganz gelegentlich vor – besonders natürlich dort, wo es gilt, Energie loszuwerden: beim »Bremsen« oder schnellen Herabkommen aus der Höhe.

Aus dem Gesagten ergibt sich schon, daß es für den Vogel (wie für jedes

Flugzeug) darauf ankommen muß, seine *Luftkräfte so zu erzeugen*, daß die *Strömung überall am Flügel glatt anliegt* und nirgends unter Wirbelbildung abreißt; dies ist bekanntlich bei der zweiten Möglichkeit: Anblasung im spitzen Winkel (Anstellwinkel) von vorn-unten her der Fall. In der Größe des zulässigen Winkelbereichs zeigt sich hier der schwingende Flügel gegenüber dem ruhenden etwas im Vorteil: Beim nicht bewegten Flügel darf der Anstellwinkel etwa 15°–20° (je nach der Form des Profils) nicht überschreiten; beim schwingenden liegt die Strömung auch noch bei Anblasung im Winkel von etwa 30° gut an, wie sich aus dem Bereich der besten Wirkungsgrade in unseren Messungen ergeben hat. Dieser Vorteil ist eine Funktion der instationären Strömung; der im Verlauf einer Bewegungsphase rasch von Null oder jedenfalls einem kleinen Wert bis zum Maximalwert ansteigende und gleich wieder zurückgehende Anstellwinkel läßt der Strömung gleichsam keine Zeit zur Ablösung.

Welche *Richtung* hat nun die *Luftkraft* bei einem so angeblasenen Flügel? Die Antwort lautet anders, als man wohl erwarten sollte: Die *Richtung hängt*, innerhalb des »erlaubten« Winkelbereichs, *nicht* etwa *von der Stellung der Fläche*, sondern fast allein von der *Richtung* der *Anströmung* ab: Sie steht auf der letzteren immer annähernd senkrecht, indem der Winkel zwischen Anströmung und Richtung der Gesamtluftkraft einige wenige Grade mehr als 90° beträgt. Diese Tatsache steht nicht im Widerspruch zu der anderen, bekannteren, daß der Druck (Sog) an jedem Flächenpunkt senkrecht auf der Fläche stehen muß; der scheinbare Widerspruch löst sich damit auf, daß die an den einzelnen Punkten des Profils angreifenden Kräfte ihre Größe mit steigendem Anstellwinkel sehr stark ändern, indem vor allem an der Vorderkante ein stark zunehmender Sog entsteht, der dafür sorgt, daß sich die resultierende Gesamtluftkraft mit steigendem Anstellwinkel relativ zur Fläche nach vorne neigt, relativ zur Anströmung ihren Winkel aber fast beibehält.

Diese Erscheinung wird verständlich, wenn wir die Geschwindigkeiten genauer betrachten, die am Flügel herrschen. Die ankommende Strömung wird nämlich auf der Flügelunterseite verlangsamt, auf der Oberseite beschleunigt und erreicht vorn über der »Flügelnase« die größte Geschwindigkeit. Da nun nach einem bekannten Gesetz der auf eine Wand ausgeübte Druck einer Flüssigkeit mit zunehmender Geschwindigkeit der Strömung abnimmt, so haben wir nicht nur, was jedem einleuchtet, auf der Unterseite einen Überdruck, sondern oben und besonders vorn einen Unterdruck. Man kann die Strömung um den Flügel auch so beschreiben, daß man sagt, der gleichmäßi-

gen Anströmung überlagere sich eine Zirkulationsströmung um den Flügel, die oben in Anströmrichtung, unten gegen die Anströmung verläuft. So entsteht gleichsam eine angeblasene »Luftwalze«, und daß ein solcher rotierender Wirbel eine Kraft senkrecht zur Anströmung erfährt, hat jeder (wenn auch unbewußt) schon gesehen, der Rauchringe blies und bemerkte, daß sich ihr Durchmesser vergrößert, solange sie vorwärts wandern. Denn ein gelungener Rauchring ist ein kreisförmig in sich geschlossener Wirbel, dessen Außenseite sich in Anströmrichtung bewegt, dessen Luftkraft also vom Mittelpunkt allseitig nach außen gerichtet ist, wie die Skizze Abb. 1 veranschaulicht [6].

Die Komponente der Gesamtluftkraft, die auf der Anströmung senkrecht steht, nennt man *Auftrieb*, den kleinen, nur einen geringen Bruchteil des Auftriebs betragenden Rest in Anströmrichtung *Widerstand*. Die Eleganz des Fliegens mit dem Auftrieb (das dem Prinzip des Schraubendampfers entspricht) mit ihrer wirbelfreien Umströmung des Flügels hat ihr Gegenstück in einer größeren Ökonomie, im besseren Wirkungsgrad, der beim schwingenden, Auftriebskräfte erzeugenden Flügel bei kleinen Reynoldsschen Kennzahlen um rund die Hälfte höher liegt als bei der Ausnutzung von Widerstandskräften. Der Widerstand wächst bei dieser Form der Luftkrafterzeugung erst dann sehr rapide, wenn man über den zulässigen Anstellwinkel hinausgeht und die Strömung an der Flügeloberseite abreißt; beim Extremfall, dem Anstellwinkel von 90°, gibt es, wie schon besprochen, nur noch Widerstand. Das Beispiel der Rauchringe (Abb. 1) ist auch geeignet, deutlich zu machen, daß die Ausdrücke Auftrieb und Widerstand sich nur auf die Anströmrichtung, nicht etwa auf die Erdoberfläche beziehen: »windfestes Bezugssystem«; es gibt also z. B. auch erdwärts gerichteten Auftrieb (den man freilich auch Abtrieb nennen kann).

Soviel über die Richtung der am Flügel auftretenden Luftkraft; über ihre Größe genügen wenige Worte: Sie wächst in sehr einfacher Weise proportional mit der Größe der Fläche und mit dem Anstellwinkel und außerdem proportional mit dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit.

6 Auch des einst vielbesprochenen Fletner-Rotors, der auf im Grunde gleichen Prinzip beruht (Magnuseffekt), wobei nur ein fester Zylinder den »Kern« des Wirbels bildet, werden manche sich noch erinnern. Nun ist freilich ein Zylinder wegen seines Widerstandes kein ideales Flugorgan; aber man kann, wie andernorts näher dargelegt, auch durch Rotieren des Tragflügels selbst um seine Längsachse bei Bedarf ganz entsprechende, sehr starke Kräfte senkrecht zur Anströmung (Auftriebe) erzielen! Die ohnehin schon vorhandene Zirkulation wird durch diese Bewegung eben nur noch erheblich gesteigert.

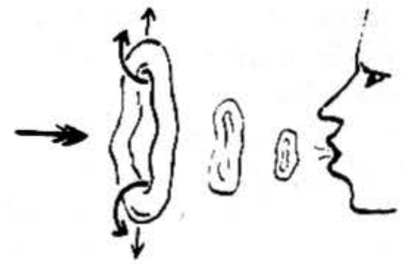

Abb. 1 Skizze, die das Auftreten einer auf der Anströmrichtung senkrecht stehenden Kraft bei »Rauchringen« verdeutlichen soll. Der Rauchring rotiert im Sinne der gebogenen Pfeile, der Doppelpfeil bezeichnet die Anströmrichtung, die einfachen Pfeile die Richtung des »Auftriebs«, der den Ring vergrößert.

Die bisher skizzierte Darstellung genügt nur für den stationären Fall des *ruhenden Flügels*; die Sachlage wird sogleich verwickelter, wenn wir den Flügel eine *schwingende Bewegung*, einfachheitshalber in einer Ebene senkrecht zur Anströmung, ausführen lassen. Denn jetzt, im instationären Fall, *ändern* sich nicht nur *Größe und Richtung der Luftkräfte in jedem Augenblick der Bewegung*, sondern sie sind überdies noch an *jeder Stelle* des *Flügelschnittes verschieden*, da ja die Amplitude der Schwingenbewegung zur Flügelspitze hin zunimmt.

Welche Bewegung muß nun ein *auf vorgegebener Bahn schwingend fortbewegter Flügel ausführen*, damit er erstens in jedem Moment eine das Gewicht des Körpers *tragende Kraft* und zweitens eine ausreichende, den Vogel in *Flugrichtung* vorwärtsziehende Kraft, den *»Vortrieb«* oder *»Schub«* liefert? Wir wollen dabei noch die Forderung stellen, der Flügel solle in jeder Phase sich so einstellen, daß die Strömung nirgends abreißt.

Es ist leicht einzusehen, daß der Flügel auf einer Bahnkurve von der Steilheit der Skizze (Abb. 2 a) diese wichtige Forderung der »gesunden« Strömung nicht erfüllen kann, wenn er einfach als *ebene Platte* auf und abschlägt; denn dann würden die Anstellwinkel an den Flügelenden 30° wesentlich überschreiten, und die Strömung müßte hier abreißen. Das Ergebnis wäre: anstrengende Bewegung und doch wenig Schub. Die erste Änderung, die wir am Bewegungsvorgang anbringen müssen, ist also eine Drehung, *Verwindung des Flügelendes* in Anpassung an die sich ändernde Anströmrichtung (Abb. 2 b). Diese *Drehschwingung* muß gegen die Schlagschwingung derart zeitlich verschoben (phasenverschoben) sein, daß der Umkehrpunkt der einen Schwingbewegung mitten zwischen zwei Umkehrpunkten der anderen liegt. Diese Drehschwingung ist das A und O des ganzen *Schwin-*

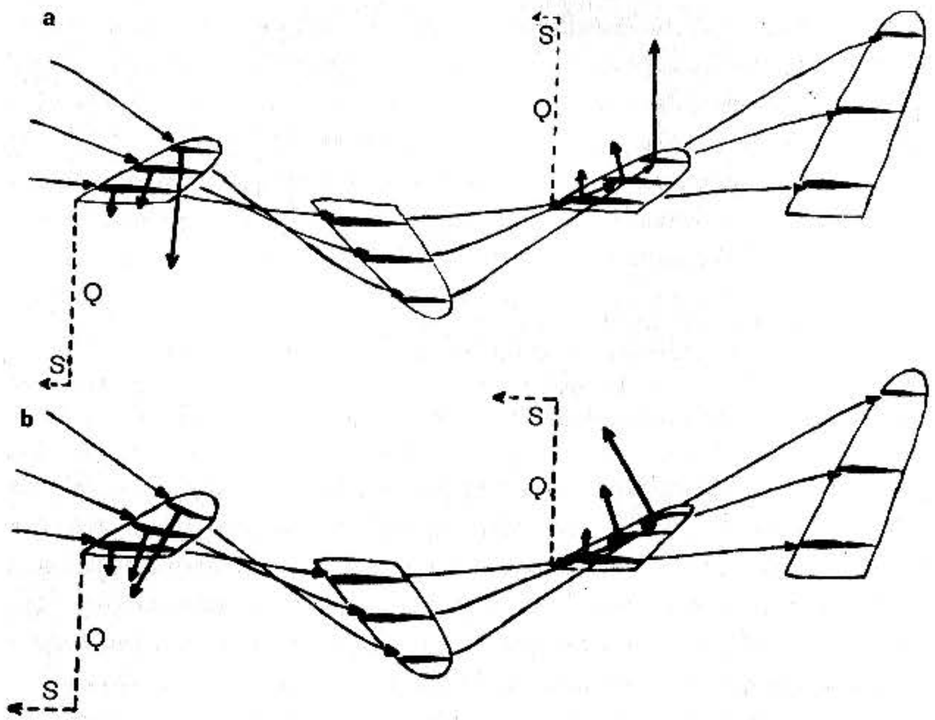

Abb. 2 Schemata zur Erläuterung verschiedener Möglichkeiten der Flügelbewegung. Der Flügel bewegt sich in a und b von rechts nach links, die Kurven bezeichnen den Weg der Flügelschnitte; die in diesen Schnitten auftretenden Luftkräfte sind durch *ausgezogene Pfeile* bezeichnet; die *unterbrochenen Pfeile* stellen jeweils die insgesamt bei dieser Stellung auftretende Kraft senkrecht zur Flugrichtung (Querkraft Q) und die Kraft in Flugrichtung (Schub *S*) dar.

genflugproblems; ihre richtige Steuerung ist für den lebenden wie für den künstlichen Vogel von entscheidender Bedeutung. Die so erhaltene Bewegung erzeugt überall Auftrieb mit gutem Wirkungsgrad, also wenig Widerstand; außerdem sehen wir, da Auf- und Abschlag einander spiegelbildlich gleich sind, die aus der Flugrichtung abweichenden Kraftkomponenten – wir wollen sie »*Querkräfte*« nennen – sich für Ab- und Aufschlag die Waage halten, so daß insgesamt nur eine Kraft in Flugrichtung, ein Schub, übrigbleibt.

Ist nun bei irgendeinem Vogel ein Fliegen in horizontaler Richtung nach diesem Schema 2 b verwirklicht? Jawohl, z. B. beim unter Wasser »fliegenden« Pinguin, der ja sein Gewicht nicht zu tragen braucht (im Gegenteil sogar mit seinem breiten, vorn stärker gesenkten Körper immer etwas für

Abtrieb sorgen muß, da er spezifisch leichter ist als das Wasser[7]). In der Luft dagegen, wo die Hauptaufgabe im Tragen des Gewichts besteht, wird eine solche Bewegung erst dann möglich, wenn wir das Schema 2 b um 90° drehen – Flugrichtung senkrecht nach oben – und das Gewicht einfach an den vertikal gestellten Schub anhängen. Ein senkrecht nach oben fliegender Kolibri verwirklicht etwa diese Bewegungsart: Seine Flügel schwingen statt in vertikaler in horizontaler Ebene, und sein Schub hat Schwerkraft und Luftwiderstand der Vorwärtsbewegung zugleich zu überwinden.

Von dieser Bewegung zu der des am *Platz schwirrenden Kolibris* ist nur ein kleiner Schritt. Wir lassen die pro Flügelschlag durchmessene Strecke immer kleiner – und natürlich auch die Anstellwinkelschwingung entsprechend größer – werden (Abb. 3 c), bis die Vorwärtsbewegung Null wird und die Flügel in einer Ebene schwingen (3 d). Dabei machen wir folgende Beobachtungen: Während zuvor (2 b) starke Querkräfte auftraten, sind diese jetzt ganz klein geworden und bestehen nur noch im Bahnwiderstand, den der Flügel zu überwinden hat; der ganze Auftrieb wird als Schub, also hier als tragende Kraft, nutzbar gemacht, das heißt, daß der Schwirrflug oder Rüttelflug den Vogel pro Flügelschlag viel weniger Kraft kostet als der Flug in einer Vorwärtsrichtung (nicht nur nach oben, sondern übrigens auch in horizontaler Richtung). Auf der anderen Seite aber sehen wir, daß der Flügel beim Flug auf der Stelle einen viel kürzeren Weg zurücklegt als zuvor; die Anströmgeschwindigkeit sinkt also ab, und deshalb muß der Vogel – das gilt für jeglichen Flug auf der Stelle – Schlagamplitude oder Schlagfrequenz oder beides zugleich erhöhen, um überhaupt genug Schub zu gewinnen und nicht abzusinken. Damit aber wird die erforderliche Leistung (trotz der leichteren Flügelbewegung) der vorigen wieder mehr angenähert.

Dieses *Fliegen auf der Stelle* ist nun an *gewisse Bedingungen* geknüpft: Einmal ist es um so günstiger, je relativ kleiner die Fläche und höher die Schlagfrequenz ist, denn da die in der Schwingebene auftretenden Widerstandskräfte des Vor- und Rückschlags allein durch die Trägheit der Körpermasse gegeneinander ausgeglichen werden, so treten periodische Massenbeschleunigungen auf, die bei langsamer Schlagfrequenz sich als grobes Hin- und Herwackeln unangenehm bemerkbar machen müssen, wie man es bei großen rüttelnden Vögeln deutlich wahrnehmen kann. Zum zweiten muß

7 Es ist mir nicht bekannt, ich vermute aber, daß beim Pinguin Flügelheber und -senker einander an Masse weitgehend entsprechen werden, vielleicht in noch höherem Maße als beim Kolibri.

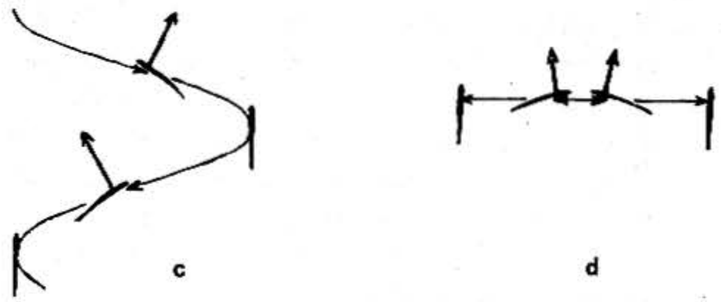

Abb. 3 Fortsetzung von Abb. 2; jedoch ist hier einfachheitshalber nur ein Flügelschnitt nahe dem Flügelende berücksichtigt.

der Flügel über eine sehr starke Schwenkbarkeit um seine Längsachse verfügen, da die Anströmrichtung sich ja um 180° ändert. Drittens muß er nach Möglichkeit so gebaut sein, daß die normale Wölbung bei Anströmung von unten im »Abschlag« (Schlag nach vorne) sich in eine entgegengesetzte bei Anströmung von oben her im »Aufschlag« (Bewegung nach hinten) verkehrt. Und viertens müssen die Flügelheber, die hier im Idealfall das gleiche zu leisten haben wie die Flügelsenker, diesen an Kraft möglichst gleichkommen. All diesen Forderungen genügt in vollkommenster Weise der Kolibri. Seine hohe Schlagfrequenz und Verwindbarkeit des Flügels sind ja bekannt[8]; daß die Flügelheber den Senkern an Masse nicht ganz gleich kommen, hängt natürlich damit zusammen, daß Kolibris auch große Strecken zurücklegen, wobei die Senker überwiegende Arbeit zu leisten haben.

Die Wölbung des Flügels nach beiden Seiten wird durch das weitgehende Parallellaufen der Hand- und spärlichen Armschwingen mit der Flügellängsachse ermöglicht; von diesen »lauter ersten Handschwingen« (Lorenz) weichen die der mittleren Region jeweils der Anströmung etwas aus, dadurch der Fläche eine ausgesprochene Wölbung verleihend[9].

8 Vgl. den Zeitlupenfilm über den Schwirrflug des Kolibris von Stolpe aus der Reichsanstalt f. Film u. Bild, Berlin (Stolpe 1939).

9 Diese für einen guten Auftrieb so wichtige, spiegelbildliche Umkehrung der Flächenwölbung kann man auf dem schönen Kolibrifilm, den Stolpe zusammen mit der Reichsanstalt f. Film u. Bild hergestellt hat, sehr deutlich erkennen; Stolpe selbst hat das anscheinend, nach seinen Zeichnungen (Begleittext zum Film) zu urteilen, nicht bemerkt. – Dagegen hat schon Lorenz (1933) festgestellt, daß für alle guten »Platzrüttler« dieses Parallellaufen der Schwingen mit dem Flügel typisch sei, ohne einen einleuchtenden Grund dafür zu finden. Man vergegenwärtige sich aber einmal den umgekehrten Fall, daß alle Schwingen rechtwinklig von der Flügelvorderkante nach hinten gingen: Der Flügel würde dann unvermeidlich in jeder

Wie die für diese Flugart weniger prädestinierten Vögel mit dem Problem des »Platzrüttelns« (Lorenz) fertig werden, indem bei langsamer Schlagfrequenz der gespreizte Schwanz der nicht ausreichenden Massenträgheit zu Hilfe kommt, indem ferner der ungenügenden Verwindbarkeit des Flügels durch zusätzliche Drehung der einzelnen Handschwingen um ihre Längsachse nachgeholfen wird und schließlich die zu schwachen Flügelheber u. U. durch Verkleinern (»Einrollen«) oder sogar Anlegen des Flügels an den Körper beim Aufschlag möglichst entlastet werden usw., darauf näher einzugehen würde hier zu weit führen. Die klassische Darstellung hat hier Lorenz geliefert.

Wenden wir uns dem für unsere Zwecke wichtigeren *Horizontalflug* zu und kehren dazu zu unserem Ausgangsschema (Abb. 2 b) zurück! Was müssen wir hier an der Flügelstellung ändern, wenn im Horizontalflug außer dem vortreibenden Schub auch noch eine das Gewicht tragende Vertikalkraft auftreten soll? Versuchen wir es in der naheliegenden Weise, daß wir dem Flügel schon in der Ausgangsstellung (Nullstellung) einen bestimmten Anstellwinkel zur Flugrichtung geben, wie ihn auch ein gleitender Vogel besitzen muß, und diesem Winkel die vorherige Drehbewegung noch überlagern. Das Ergebnis zeigt Abb. 4 a; an den Umkehrpunkten der Schlagbewegung, wo der Flügel einen Augenblick ruht und überall aus der Flugrichtung angeblasen wird, tritt die durch den Anstellwinkel erzeugte Querkraft – hier gleichbedeutend mit Auftrieb – rein hervor; beim Abschlag tritt sie zur zuvor (2 b) vorhandenen hinzu, beim Aufschlag wirkt sie ihr entgegen; in unserem Fall gerade so, daß als Rest allein ein kleiner Vortrieb übrigbleibt. Wir bemerken ferner, daß beim Aufschlag nur noch das Flügelende von oben, der übrige Flügel aber von unten her angeströmt wird (es muß also hier eine gewisse »tote« Zone im Flügel geben, wo die Anströmung genau von vorn kommt). Im ganzen haben wir so eine erhebliche tragende Vertikalkraft gewonnen, die aber periodisch zwischen Null und einem Maximum schwankt, während der Schub nur sehr wenig gegenüber der »reinen Schubstellung« von Abb. 2 b zurückgeht (was auf das Konto des Aufschlags geht). Daß die Flügelsenker jetzt wesentlich mehr Arbeit zu leisten haben als die Flügelheber, leuchtet ohne weiteres ein.

Bewegungsphase sich nach der falschen Seite verbiegen! – Die Herstellung der richtigen Wölbung je nach der Anströmung ist nicht nur für Bewegung in der Luft, sondern auch, soweit es sich um wirkliche »Könner« handelt, im Wasser sehr bedeutsam. An Fischflossen habe ich raffinierte Einrichtungen zur selbsttätigen Wölbung der Fläche mit der Konkavität *gegen* die Anströmung aufgefunden.

Fragen wir uns, wo diese Bewegungsform verwirklicht ist, so müssen wir bedenken, daß wegen der starken Schwankungen der tragenden Kraft die geforderte, annähernd gradlinige Fortbewegung des Körpers nur bei kleinen Vögeln mit hoher Schlagfrequenz in Frage kommen kann. Das Paradebeispiel dürfte auch hier wieder der Kolibri im Horizontalflug sein; aber sicherlich folgen auch die Mauersegler im Schnellflug, die kleineren Sittiche, Enten, Taucher und viele andere, die es gleichermaßen nicht nötig haben, für eine möglichst gleichbleibende tragende Kraft zu sorgen, mehr oder weniger genau diesem Schema.

Für die größeren, langsamschlagenden Formen ebenso wie für unsere gleichfalls langsam schlagenden Modelle müssen wir dagegen noch eine Verbesserung anbringen, welche die *tragende Querkraft gleichmäßiger* auf den ganzen Weg *verteilt*. Dazu belassen wir die Bewegung an der Flügelspitze so, wie sie ist, geben aber dem *rumpfnahen Flügelteil* eine *stärkere Anstellwinkelschwingung*, so daß an die Stelle einer bloßen, zum Flächenende zunehmenden Verwindung eine richtige *Drehschwingung* des *ganzen Flügels* tritt, die nur durch eine zusätzliche Verwindung distalwärts noch verstärkt wird. Die Wirkung dieser Abänderung (Abb. 4 b) ist, daß beim Abschlag der proximale Flügelteil weitgehend entlastet wird, während das Flügelende Schub und ausreichende Tragkraft erzeugt. Beim Aufschlag dagegen übernimmt der stark heraufgedrehte Armteil die wichtige Rolle, zu tragen, dabei unvermeidlichen Rücktrieb in Kauf nehmend, der allerdings durch das immer noch von oben angeströmte, nach vorn-unten wirkende Flügelende großenteils kompensiert wird. Wir erreichen so eine zwar nicht völlig, aber doch weitgehend *gleichmäßige Verteilung* der *tragenden* Vertikalkraft über die ganze Strecke, handeln aber dafür einen stärker (bis ins Negative hinein) *schwankenden Vortrieb* ein. Doch dieses Manko ist unbedeutend; da der insgesamt benötigte Schub immer nur einen kleinen Bruchteil der erforderlichen Vertikalkraft beträgt (also auch seine Schwankungen gegenüber denen der letzteren im Schema 4 a klein sind), so reicht auch bei sehr langsamem Flügelschlag die Trägheit der Körpermasse noch aus, um der Fortbewegung nahezu gleichbleibende Geschwindigkeit zu sichern.

Einer kurzen Erklärung bedarf noch die Frage der zu leistenden *Muskelarbeit* beim *Flügelaufschlag*, die man gewöhnlich falsch beurteilt. Im Schema 4 a, wo beim Aufschlag insgesamt keine Querkraft auftritt, wird der Flügel, so scheint es wenigstens, gehoben, ohne Arbeit leisten zu müssen, in 4 b ist der Aufschlag sogar »passiv« und braucht nur gebremst zu werden, wobei theoretisch sich noch Energie zurückgewinnen ließe. Das sind jedoch

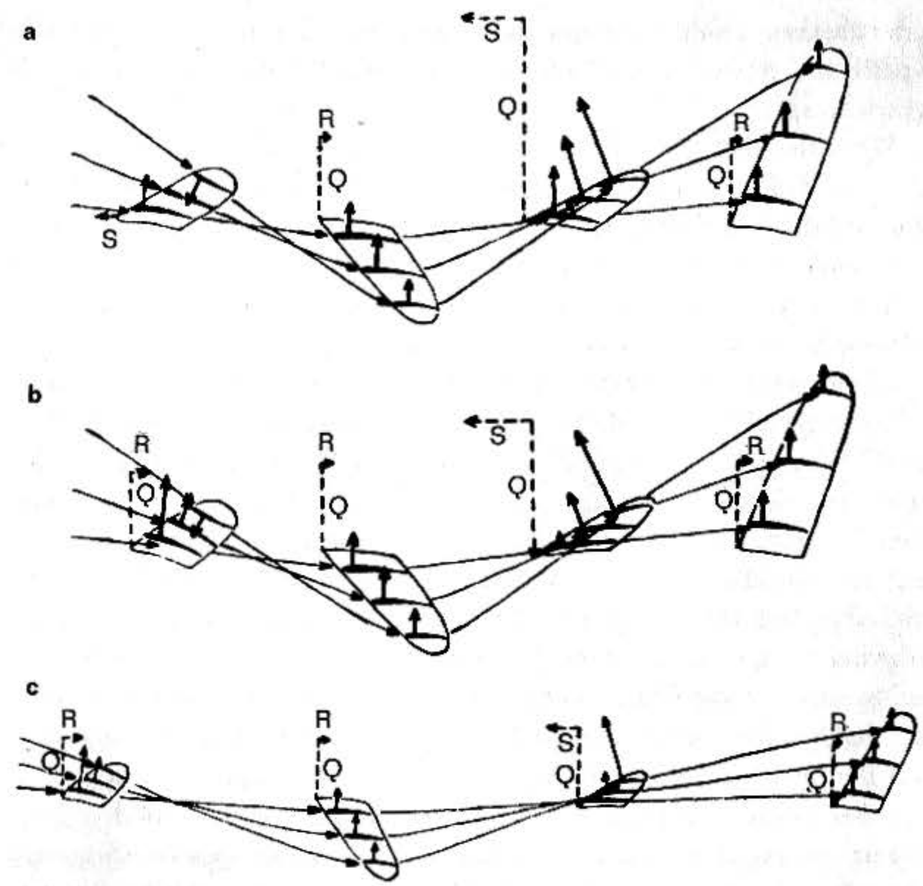

Abb. 4 Weitere Fortsetzung von Abb. 2; Bezeichnungen wie dort (*R* = Rücktrieb); nähere Erläuterungen im Text.

Trugschlüsse! Man übersieht dabei leicht, daß es sich um eine Winkelbewegung handelt, wobei es für das im Drehpunkt angreifende Moment auf die Länge des Hebelarms entscheidend ankommt. Da im Falle von 4 a die proximale Flügelzone eine Kraft nach oben, die distale eine entsprechend große nach unten erleidet, so tritt ja insgesamt am Flügel ein Drehmoment auf, das ihn im Gelenk *herab* zu bewegen trachtet und gegen das zur Flügelhebung eine nicht unerhebliche Kraft aufzuwenden ist. Diese Kraft ist es, die sich in den nutzbaren Schub umsetzt, der bei rein passivem Aufschlag ja nicht entstehen könnte. Im Schema 4 b, wo die Querkraft nach unten am Flügelende nur einen Bruchteil der entgegengerichteten Querkraft am ganzen übrigen Flügel beträgt, mag die zur Flügelhebung benötigte Kraft um Null betragen; erst wenn der Flügel nur noch an seiner äußersten Spitze

oder überhaupt nicht mehr von oben angeströmt wird, kann von einem rein »passiven« Aufschlag die Rede sein. Auf diese Möglichkeit kommen wir gleich zu sprechen.

Wir haben bereits oben beim Übergang zum Rüttelflug (Abb. 2 b–3 d) gesehen, daß die Bahnkurve, auf der sich der Flügel bewegt, nicht nur das Ausmaß der erforderlichen Anstellwinkelschwingung und Verwindung, sondern auch die Richtung der am Flügel auftretenden Kräfte bestimmt. Für jede etwas genauere Darstellung der Bewegung eines Vogelflügels muß man also die *Steilheit der Bahnkurve* kennen; darum wäre es dringend erwünscht, wenn Vogelbeobachter neben den bisher vorwiegend gemessenen Fluggeschwindigkeiten auch nach Möglichkeit die Schlagfrequenzen und Schlagamplituden (letztere lassen sich aus vielen schnell nach dem Flugbild hingeworfenen Skizzen, besonders wenn der Vogel auf den Betrachter zu oder von ihm fortfliegt, ermitteln) abschätzen würden, aus denen, zusammen mit der Flügellänge, sich die wirkliche Bahnkurve ergibt. Wir können als einfaches Maß für die Steilheit der Bahnkurve das Verhältnis der Fluggeschwindigkeit v zur mittleren Geschwindigkeit u, mit der sich die Flügelspitze auf der zur Flugrichtung etwa senkrechten Schwingebene bewegt, verwenden: den *Fortschrittsgrad* $\lambda = {}^{v}/_{u}$. Der Fortschrittsgrad ist beim Flug auf der Stelle = 0, in den Schemata der Abb. 2, a, b und 4, a, b beträgt er 1,4. Bei zahlreichen Vögeln ist der *Fortschrittsgrad* noch erheblich *größer*, die Bahnkurve also flacher; die Skizze 4 c zeigt, wie sich dabei die Situation gegenüber der von 4 b ändert: die Erzeugung einer gleichbleibenden tragenden *Vertikalkraft* ist jetzt, bei so flacher Bahnkurve, gar *kein Problem* mehr. Dafür aber wird die Frage der *Schuberzeugung* immer *schwieriger*; nur wenn der Flügel (und natürlich auch der Körper) aerodynamisch vortrefflich gebaut ist, so daß die Widerstandskräfte gegenüber den Auftriebskräften außerordentlich klein werden, die Gesamtluftkraft also überall nahezu senkrecht auf der Anströmung steht, kann der Rücktrieb im Aufschlag und an den Umkehrpunkten so klein gehalten, der Schub im Abschlag so groß gemacht werden, daß insgesamt Vortrieb genug zur Überwindung des Körperwiderstands übrigbleibt. Dazu muß aber im Abschlag die ganze proximale Flügelzone kaltgestellt (von vorn angeblasen) werden, weil ja das Flügelende, das Organ der Schuberzeugung, maximal belastet werden muß, und umgekehrt muß im Flügelaufschlag, der passiv (= Anströmung von unten) erfolgt, das Flügelende ausgeschaltet sein, das bei Anströmung von unten her (wie sie zu Unrecht allgemein angenommen wird) einen untragbar starken Rücktrieb erzeugen würde! Es ist also keine Übertreibung, wenn

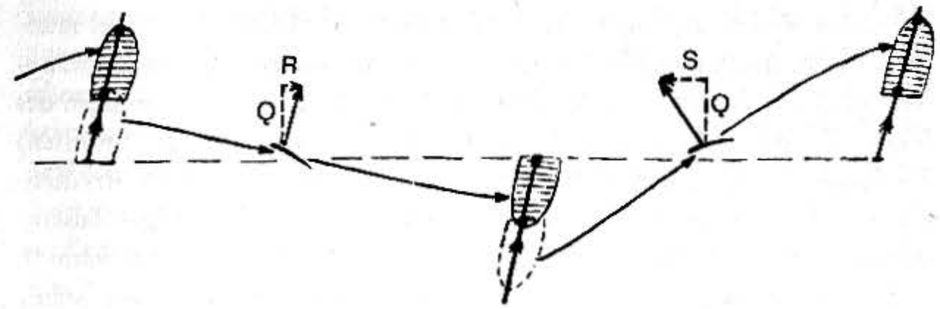

Abb. 5 Skizze, die schematisch in vereinfachter Weise die Wirkung des Flügels beim Flug mit großem Fortschrittsgrad deutlich machen soll. Der Flügel ist auf seiner Längsachse verschiebbar: Er wandert am oberen Umkehrpunkt der Bewegung distalwärts, am unteren wieder proximalwärts an den Rumpf zurück. So geht er beim Abschlag auf steiler Kurve bergab, beim Aufschlag auf flacher bergauf und gewinnt dadurch, wie die Pfeile zeigen, insgesamt einen erheblichen Vortrieb. (Bezeichnungen wie in Abb. 2 und 4.)

man sagt, der bei großem Fortschrittsgrad fliegende Vogel gebraucht abwechselnd nur den Handteil (Abschlag) und nur den Armteil (Aufschlag) seines Flügels – am liebsten wäre es ihm, wenn beim Abschlag der Armteil, beim Aufschlag der Handteil fehlte[10]! Man kann sich diese wichtige Tatsache auch so plausibel machen, daß man sich vorstellt, die Flügelfläche wäre verkürzt und könnte am Arm entlang rutschen, und sie würde am oberen Umkehrpunkt distalwärts auf die Hand, am unteren Umkehrpunkt proximalwärts auf den Oberarm verschoben (Abb. 5). Der Effekt dieses geniale Tricks, der eigentlichen Auflösung des »Rätsels« der Flugbewegung (wenn wir diesen Ausdruck schon gelten lassen wollen) ist, *daß der Flügel auf der steilen Bahn des Abschlags viel Schub gewinnt, auf der flachen des Aufschlags aber nur wenig Rücktrieb erleidet, während die tragende Kraft überall etwa gleich ist.*

Ein derartiges Gedankenmodell läßt sich natürlich auch in die Tat umsetzen. Mit ihm wird eine Reihe von bisher ziemlich allgemein mißdeuteten Besonderheiten der Flügelbewegung vieler Vögel verständlich, die alle das eine Ziel haben, den Abstand: Flügelbasis – Flügelspitze beim Abschlag möglichst groß, beim Aufschlag möglichst klein zu machen. Das geschieht z. B. durch Abwinkeln im Handgelenk nach hinten beim Aufschlag, wie es

10 Wenn Freund Lorenz' (1933) Schwarzstorch, der keine Armschwingen besaß, zwar noch gut Hochrütteln, aber nicht mehr waagerecht fliegen konnte, so war es die tragende Kraft des Flügelaufschlages, die ihm fehlte!

bei vielen Vögeln angedeutet (elliptische Bahn der Flügelspitze), bei manchen – z. B. den Schwalben im Gegensatz zu den obenerwähnten Seglern – sehr stark ausgebildet ist. Oder es geschieht durch starkes Herabbeugen des Handteils oder schließlich durch weitgehendes Zusammenziehen (Einrollen) des Flügels beim Aufschlag (Beispiel: Eichelhäher und Spechte im Streckenflug), woraus zumal bei frequent schlagenden Formen ein völliges Zusammenlegen, d. h. am Körper entlang Nach-oben-Schieben, werden kann [11].

Aus dieser Darstellung wird wohl deutlich geworden sein, wie wenig glücklich die üblichen Schemazeichnungen über die am Flügel angreifenden Kräfte sind; nicht nur, weil dabei meist die grundsätzlichen *Unterschiede der einzelnen Flügelzonen,* die ja den *Knalleffekt* des Ganzen ausmachen, vernachlässigt werden, sondern auch, weil die stets um ein Vielfaches übertrieben groß eingezeichnete Widerstandskomponente eine gedankliche Übertragung auf die tatsächlichen Verhältnisse bei hohen Fortschrittsgraden unmöglich macht. Beim Fortschrittsgrad von $\lambda = 3$ des Schemas Abb. 4 c muß, wie ersichtlich, die Luftkraft wirklich nahezu senkrecht auf der Anströmung stehen; es gibt aber nicht wenige Vögel, z. B. Tauben, Falken, die im schnellen Horizontalflug noch höhere Fortschrittsgrade erreichen. Dazu gehört neben tadelloser Formgebung und geringer Flügelelastizität – der Flügel muß bei nicht gespreizten Handschwingen hart sein, da er sich nur sehr wenig passiv verwinden darf – auch noch eine nicht zu geringe absolute Größe und große absolute Geschwindigkeit (hohe Flächenbelastung), mit anderen Worten: ein Flug bei hohen Reynoldsschen Zahlen. Der erreichbare *Fortschrittsgrad* ist in der Tat von der *Re-zahl abhängig* und wächst mit ihr; bei sehr kleinen Re-Zahlen – um 1000 – kommt man z. B. nach unseren Messungen und nach übereinstimmenden Beobachtungen an Insekten und Flugmodellen über einen Fortschrittsgrad von $\lambda = 1$ kaum wesentlich hinaus. *Geringe Größe, geringe Flächenbelastung, geringer Fortschrittsgrad, kleine Re-Zahl,* dabei aber *große Drehschwingung* und *große Schlagfrequenz* einerseits – und *erhebliche Größe, hohe Flächenbelastung, großer Fortschrittsgrad, hohe Re-Zahl, jedoch kleine Drehamplitude, geringe Schlagfrequenz* andererseits sind somit Eigenschaften, die jeweils zusammengehören.

Diese Gegenüberstellung hat – wie jeder aerodynamisch-technische Gesichtspunkt – auch ihre physiologischen Seiten. So z. B. gehört zur Flugbewegung bei kleinen Re-Zahlen, geringem Fortschrittsgrad und hoher Frequenz ein relativ »hochtouriger Motor«, der folglich die benötigte Leistung schon bei geringer Kraft aufbringt; die Insekten (und ähnlich der Kolibri) kommen darum mit verhältnismäßig schwachen Muskeln aus, das Hauptproblem ist für sie der Stoffwechsel, die Schnelligkeit von Stoffaufnahme, Stofftransport und Energieumsetzung. Die größeren, bei hohen Re-Zahlen, großem Fortschrittsgrad und *langsamer* Schlagfrequenz *schnell* dahinfliegenden Vögel dagegen brauchen einen niedrigtourigen Motor von relativ ungeheurer Kraft; für sie also tritt das Problem der Muskelmasse (vor allem Masse der Flügelsenker) vordringlich auf den Plan, während die Sorge um den Stoffwechsel wegen des besseren Wirkungsgrades ihrer Bewegung hier etwas mehr zurücktritt.

11 Auch der relativ langsam schlagende Eichelhäher legt beim Horizontalflug über weitere Strecken beim Aufschlag die Flügel nahezu oder völlig an, wobei natürlich eine Wellenbahn des Schwerpunktes resultieren muß.

Soviel mag zur allgemeinen Einführung in die Lehre vom Schwingenflug genügen; was noch an weiteren Einzelheiten über die Verteilung der Kraft, über Stabilisierung und Steuerung usw. zu wissen not tut, läßt sich am besten am fliegenden Modell deutlich machen und sei daher im Zusammenhang mit der oder anschließend an die Beschreibung der Modelle selbst erwähnt.

Bau eines Vogelmodells

Das vorangegangene Kapitel gibt uns bereits verschiedene Hinweise zur Frage, wie das für unsere Zwecke geeignete Flugmodell beschaffen sein muß. Da seine Hauptaufgabe darin besteht, Einzelheiten der Bewegung sichtbar zu machen, werden wir uns geringe Reynoldssche Zahlen, also leichte Flächenbelastung und langsame Fluggeschwindigkeit bei nicht zu großem Fortschrittsgrad und stark ausgeprägter Drehschwingung und Verwindung, kurz etwa den Fall des Schemas Abb. 4 b zum Ausgangspunkt nehmen und zusehen, was sich von diesem Horizontalflug aus an Möglichkeiten für Steigflug, Platzrütteln usw. ergibt. Wir werden dazu dem Flügel, ebenso wie es der Vogel macht, eine aktive Drehschwingung geben und die distale Flügelzone so elastisch einrichten müssen, daß sie sich einem möglichst weiten Bereich von Fortschrittsgraden anpassen kann. Wir werden außerdem für eine richtige Verteilung der verfügbaren Kraft sorgen, die beim Abschlag um ein mehrfaches stärker sein muß als beim Aufschlag und die ferner, damit die gewünschte, etwa sinusförmige Bewegungsbahn zustandekommt, an den Umkehrpunkten von Null schnell bis zu einem Maximum in der Mitte der Wegstrecke ansteigt und ebenso vor dem Ende der Bewegungsphase wieder