

(Aus dem Zoologischen Institut Göttingen.)

**Ueber „künstliche Vögel“ als Mittel zum Studium
des Vogelflugs.**Von **Erich v. Holst.**

(Hierzu die Tafeln XVII—XIX.)

Einleitung.

Ein guter Ornithologe ist immer auch ein guter Kenner des Vogel-
fluges insofern, als er die Besonderheiten jedes Flugtypus und möglicher-
weise 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 Schwingen-
flugproblems 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 Einzel-
wissen gestört fühlen. Aus dem gleichen Grunde werden solche Bio-
logen auch geneigt sein, von vornherein jeden Versuch einer
„Technisierung“ des Tierflugs, der die lebendige Eleganz dieser Be-
wegung in starr-mechanische Formen pressen wollte, grundsätzlich ab-
zulehnen. Das eine wie das andere sind jedoch Vorurteile: Die
experimentelle und theoretische Beschäftigung mit der tierischen Flug-
technik nämlich und das Wissen um Einzelheiten und Zusammenhänge
ist nur geeignet die Augen zu schärfen und, wie der Verf. (in 15-jähriger
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: hier lebendige Schönheit, hier 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-aesthetische 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 Energien¹⁾ 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. 443) 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 REYNOLDS'schen 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 er-

1) v. H., Untersuchungen über Flugbiophysik I: Messungen zur Aerodynamik kleiner, schwingender Flügel. Erscheint gleichzeitig im Biolog. Zentralblatt.

kennbar vorzuführen, was besonders für grosse „Vögel“ von 150—200 cm Spannweite gilt, die geradezu im 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 Theorien 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 ¹⁾ 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

1) Beobachtetes über das Fliegen der Vögel, Journ. f. Ornithologie 81 (1933).

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 hinweg sieht, 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 Ueberzeugungsmittel²⁾.

Der ursprüngliche Plan dieses Aufsatzes: zugleich mit der Beschreibung mehrerer bewährter Modelle auch eine Reihe von Ergebnissen über den Einfluss der Flügelform, Flächenbelastung und REYNOLDS'schen 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

1) Ein Beispiel wäre etwa das vor kurzem in zweiter Auflage erschienene Buch von H. MASCOV „Vom Vogelflug zum Menschenflug“.

2) Seit der Verf. 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 uneigennütigen, grosszügigen Geldangeboten ist die ganze bunte Skala menschlicher Einstellungen zu diesem Problem hier vertreten.

vorhandene Literatur¹⁾ einerseits nicht frei von Fehlern und Missverständnissen ist und andererseits Wesentliches unbeachtet lässt, wodurch alles viel schwieriger erscheint, als es tatsächlich ist.

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 kon-

1) An Büchern neueren Datums ist eigentlich nur R. SCHMIDTS inhaltsreiches kleines Buch „Flug und Flieger im Pflanzen- und Tierreich“ (1939) zu empfehlen. Das Buch über Vogelflug von STOLPE und ZIMMER (1939) enthält physikalische und andere Missverständnisse und Fehler und lässt wichtige Zusammenhänge ausseracht.

stant 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 REYNOLDS'sche Kennzahl $Re = \rho v l / \mu$ aus, wobei ρ die Dichte, μ die Zähigkeit des Mediums, l ein der Fläche entnommenes Längenmaß (meist nimmt man die Flügelbreite = Flügeltiefe), v die Geschwindigkeit bedeutet.

Mit der REYNOLDS'schen Kennzahl sollte auch der Flugbiologe sich etwas befreunden, sie vermittelt ihm wichtige Erkenntnis und schützt ihn vor falschen Verallgemeinerungen¹⁾. 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-Zahl²⁾, d. h. in „zäherem“ Medium fliegenden Insekten Kanten und Rauigkeiten, 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 Uebertragung solcher Flächen ins Grosse ein glattes Fiasko ergeben würde.

Turbulenz erzeugende 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

1) 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, irgend einen bei der Feder vermuteten aerodynamischen Knalleffekt technisch auszunutzen.

2) Wesentlich unter 10000; der Bussard fliegt etwa bei $Re = 250\,000$, der Wanderfalke bei 500000, unsere Flugzeuge bei REYNOLDS'schen Zahlen von mehreren Millionen.

unseres Problems zuwenden, dem eigentlichen sogenannten „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 Vogelflugs möglich machen würde. Indessen gibt es ein solches „Rätsel“ garnicht; 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 dargelegt¹⁾; 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 Flächen¹⁾ 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

1) Oben (S. 407) zitiert.

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 „Flügel Nase“ 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 Ueberdruck, sondern oben und besonders vorn einen Unterdruck. Man kann die Strömung um den Flügel auch so beschreiben, dass man sagt, der gleichmäßigen 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.¹⁾

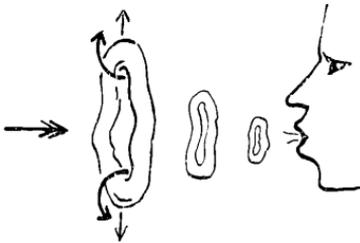


Abb. 1. Skizze, die das Auftreten einer auf der Anströmrichtung senkrecht stehenden Kraft bei „Rauchringen“ verdeutlichen soll. Der Rauchring rotiert im Sinne der gebogenen Pfeile, der Doppelpfeil bezeichnet die Anströmrichtung, die einfachen Pfeile die Richtung des „Auftriebs“, der den Ring vergrössert.

Die Komponente der Gesamtluftkraft, die auf der Anströmung senkrecht steht, nennt man **Auftrieb**, den kleinen, nur einen geringen

1) Auch des einst vielbesprochenen Flettnerrotors, der auf im Grunde gleichem 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.

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 Oekonomie, im besseren Wirkungsgrad, der beim schwingenden, Auftriebskräfte erzeugenden Flügel bei kleinen REYNOLDS'schen Kennzahlen um rund die Hälfte höher liegt als bei der Ausnutzung von Widerstandskräften. Der Widerstand wächst bei dieser Form der Luftkraftherzeugung 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.

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. 2a) diese wichtige Forderung der „ge-

sunden“ 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 Aenderung, die wir am Bewegungsvorgang anbringen müssen, ist also eine Drehung, Verwindung des Flügel-

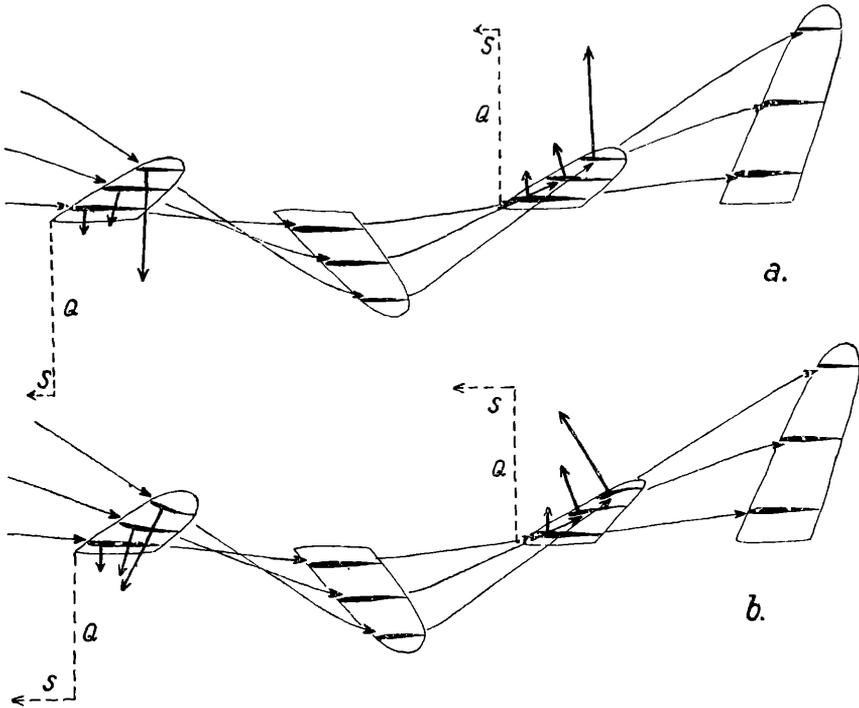


Abb. 2. Schemata zur Erläuterung verschiedener Möglichkeiten der Flügelbewegung. Der Flügel bewegt sich in **a** und **b** von rechts nach links, die Kurven bezeichnen den Weg der Flügelschnitte; die in diesen Schnitten auftretenden Luftkräfte sind durch *ausgezogene Pfeile* bezeichnet; die *unterbrochenen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

endes in Anpassung an die sich ändernde Anströmrichtung (Abb. 2b). 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 Schwingenflugproblems; 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, sodass insgesamt nur eine Kraft in Flugrichtung, ein Schub, übrig bleibt.

Ist nun bei irgend einem Vogel ein Fliegen in horizontaler Richtung nach diesem Schema 2b 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 Wasser¹⁾). In der Luft dagegen, wo die Hauptaufgabe im Tragen des Gewichts besteht, wird eine solche Bewegung erst dann möglich, wenn wir das Schema 2b 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. 3c), bis die Vorwärtsbewegung Null wird und die Flügel in einer Ebene schwingen (3d). Dabei machen wir folgende Beobachtungen: während zuvor (2b) starke Querkräfte auftraten, sind diese jetzt ganz klein geworden und bestehen nur noch im Bahn-Widerstand, 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 Anströmungsgeschwindigkeit sinkt also ab, und deshalb muss der Vogel — das gilt für jeglichen

1) 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.

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 umso günstiger, je relativ kleiner die Fläche und höher die Schlagfrequenz ist, denn da die in der Schwingenebene 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 der Flügel über eine sehr starke Schwenkbarkeit um seine Längsachse

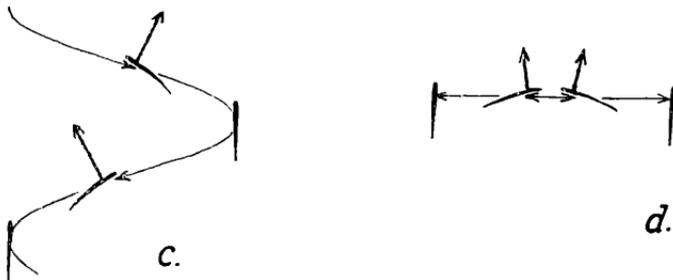


Abb. 3. Fortsetzung von Abb. 2; jedoch ist hier einfachheitshalber nur ein Flügelschnitt nahe dem Flügelende berücksichtigt.

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 Flügel-senker, diesen an Kraft möglichst gleichkommen. All diesen Forderungen genügt in vollkommenster Weise der Kolibri. Seine hohe Schlagfrequenz und Verwindbarkeit des Flügels sind ja bekannt¹⁾; dass die Flügelheber den Senkern an Masse nicht ganz gleich kommen, hängt

1) Vgl. den Zeitlupenfilm über den Schwirrfly des Kolibris v. STOLPE aus der Reichsanstalt f. Film u. Bild, Berlin und J. f. Orn. 1939, p. 136 ff.

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 ¹⁾.

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. 2b) 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. 4a; an den Umkehrpunkten der Schlagbewegung, wo der Flügel einen Augenblick ruht und überall aus der Flugrichtung ange-

1) 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 und Bild hergestellt hat, sehr deutlich erkennen; Sr. selbst hat das anscheinend, nach seinen Zeichnungen (Begleittext zum Film) zu urteilen, nicht bemerkt. — Dagegen hat schon LORENZ (l. c.) festgestellt, dass für alle guten „Platzrüttler“ dieses Parallellaufen der Schwingen mit dem Flügel typisch sei, ohne einen einleuchtenden Grund dafür zu finden. Man vergewärtige sich aber einmal den umgekehrten Fall, dass alle Schwingen rechtwinklig von der Flügelvorderkante nach hinten gingen: der Flügel würde dann unvermeidlich in jeder Bewegungsphase sich nach der falschen Seite verbiegen! — Die Herstellung der richtigen Wölbung je nach der Anströmung ist nicht nur für Bewegungen 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.

blasen wird, tritt die durch den Anstellwinkel erzeugte Querkraft — hier gleichbedeutend mit Auftrieb — rein hervor; beim Abschlag tritt sie zur zuvor (2b) vorhandenen hinzu, beim Aufschlag wirkt sie ihr entgegen; in unserem Fall gerade so, dass als Rest allein ein kleiner Vortrieb übrig bleibt. 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. 2b 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.

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 Horizontalfly 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. 4b) 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 grossen-

teils 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

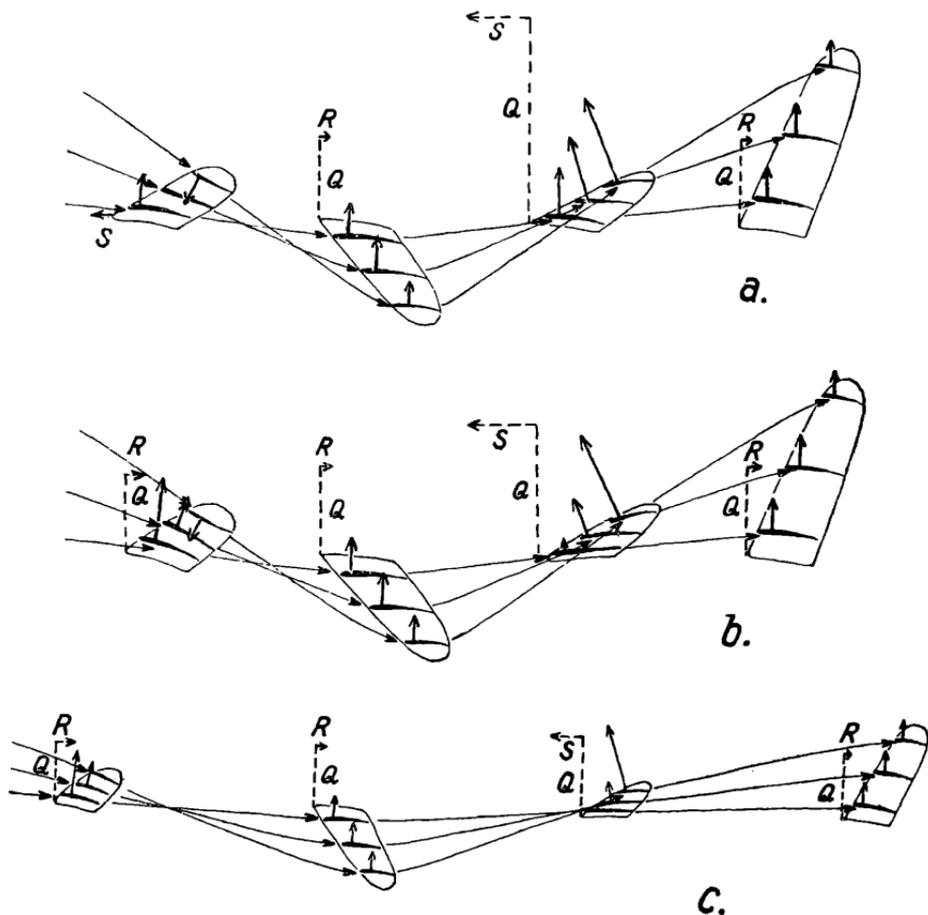


Abb. 4. Weitere Fortsetzung von Abb. 2; Bezeichnungen wie dort (R = Rücktrieb); nähere Erläuterungen im Text (S. 419–423).

immer nur einen kleinen Bruchteil der erforderlichen Vertikalkraft trägt (also auch seine Schwankungen gegenüber denen der letzteren im Schema 4a 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 4a, wo beim Aufschlag insgesamt keine Querkraft auftritt, wird der Flügel, so scheint es wenigstens, gehoben, ohne Arbeit leisten zu müssen, in 4b ist der Aufschlag sogar „passiv“ und braucht nur gebremst zu werden, wobei theoretisch sich noch Energie zurück gewinnen liesse. Das sind jedoch 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 4a 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 4b, 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 Uebergang zum Rüttelflug (Abb. 2b—3d) 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 Schwingenebene bewegt, verwenden: den Fortschrittsgrad $\lambda = v/u$. Der Fortschrittsgrad ist beim Flug auf der Stelle $= 0$, in den Schemata

der Abb. 2, a, b u. 4, a, b beträgt er 1.4. Bei zahlreichen Vögeln ist der Fortschrittsgrad noch erheblich grösser, die Bahnkurve also flacher; die Skizze 4c zeigt, wie sich dabei die Situation gegenüber der von 4b 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 Ueberwindung des Körperwiderstands übrigbleibt. Dazu muss aber im Abschlag die ganze proximale Flügelzone kaltgestellt (von vorn angeblasen) werden, wei

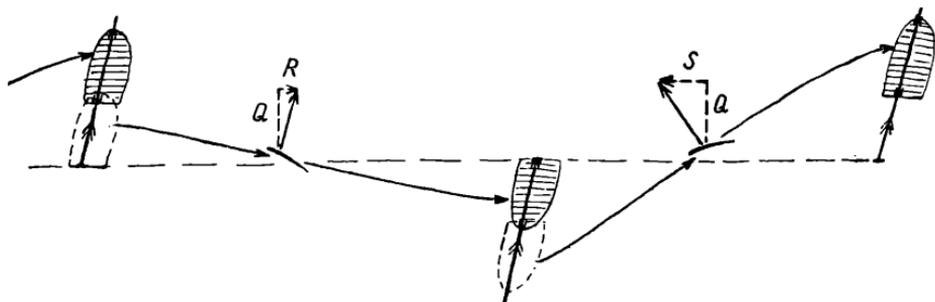


Abb. 5. Skizze, die schematisch in vereinfachter Weise die Wirkung des Flügels beim Flug mit grossem Fortschrittsgrad deutlich machen soll. Der Flügel ist auf seiner Längsachse verschiebbar: er wandert am oberen Umkehrpunkt der Bewegung distalwärts, am unteren wieder proximalwärts an den Rumpf zurück. 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.)

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 Uebertreibung, wenn 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 ¹⁾! 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 (*Skizze 5*). Der Effekt dieses genialen 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 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.²⁾

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 Uebertragung auf die tatsächlichen Verhältnisse bei hohen Fortschrittsgraden unmöglich macht. Beim Fortschrittsgrad von $\lambda = 3$ des Schemas Abb. 4c muss, wie

1) Wenn Freund LORENZ' (l. c.) Schwarzstorch, der keine Armschwingen besass, zwar noch gut Hochrütteln, aber nicht mehr wagerecht fliegen konnte, so war es die tragende Kraft des Flügelaufschlages, die ihm fehlte!

2) 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.

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 Flügel elastizität — 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 Dreh-schwingung und grosse Schlagfrequenz einerseits — und erhebliche Grösse, hohe Flächenbelastung, grosser Fortschrittsgrad, hohe Re-Zahl, jedoch kleine Dreh-amplitude, geringe Schlagfrequenz andererseits sind somit Eigenschaften, die jeweils zusammen gehören.

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.

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 REYNOLDS'sche 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

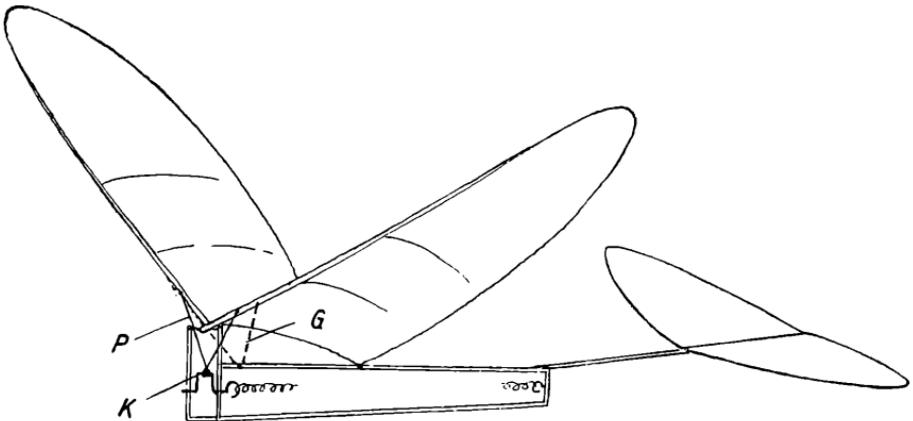


Abb. 6. Skizze eines ganz einfachen Schwingenmodells, als Beispiel, wie ein „künstlicher Vogel“ nicht gebaut werden darf (näheres im Text).

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 bis auf Null zurückgeht. Das sind Minimalforderungen, soll überhaupt eine zugleich ökonomische, ästhetisch schöne und vogelähnliche Bewegung zustandekommen.

Dass es auch ohne sie geht, zeigt die Tatsache, dass man bei genügend leichter Bauweise auch ein ganz primitives Modell nach der Skizze *Abb. 6* zum „Fliegen“ bringen kann, wie es wohl PÉNAUD um 1870 als erster getan hat und wie es die Japaner anscheinend seit Jahrhunderten betreiben. Eine durch aufgedrehten Gummistrang in Umlauf versetzte Kurbel *K* ist durch 2 Pleuelstangen *P* mit den beiden elastischen Flügeln verbunden, die ohne aktive Drehung auf- und abschwüngen. Ein angespannter Gummifaden *G* sorgt dafür, dass die Flügel nicht in erhobener Stellung stehen bleiben. An einem solchen Modell lässt sich leicht zeigen, wie alles nicht sein soll; abgesehen von Schönheitsfehlern (die Flügel schlagen ungleich, indem einer in der Bewegung voraus ist; der Schwerpunkt liegt zu weit hinten und erfordert eine grosse tragende Schwanzfläche) gibt es 1.) ein starkes Auf- und Abwackeln des Schwerpunktes, weil infolge fehlender aktiver Drehschwingung die tragende Kraft zu grosse Schwankungen erleidet; 2.) ist die Kraftverteilung auf den Weg jeder einzelnen Bewegungsphase ganz unglücklich, weil die Kraft in der Mitte der Bewegung am schwächsten (langer wirksamer Hebelarm der Kurbel), an den Umkehrpunkten aber am stärksten ist (kurzer Hebelarm); der Erfolg ist ein unschön hartes, knackendes Flügelschlagen mit sehr schlechtem Wirkungsgrad. Ebenfalls sehr störend macht sich bemerkbar, dass 3.) mit nachlassender Gummispannung auch die Kraft der Flügelschläge gleichmässig abnimmt, bis die Flügel schliesslich (möglicherweise in einer für den Gleitflug ungeeigneten Stellung) stehen bleiben.

Es ergibt sich aus diesem Beispiel, dass ein guter „künstlicher Vogel“ ein Getriebe braucht, das erstens für die richtig kombinierte Schlag- und Drehschwingung, zweitens für die günstigste Kraftverteilung mit dem Maximum auf der Mitte des Schlagweges sowie für den richtigen Kraftunterschied zwischen Ab- und Aufschlag sorgt, und das drittens bewirkt, dass die Flügelschläge vom ersten bis zum letzten mit etwa gleichbleibender Kraft vonstatten gehen. Unter den verschiedenen, im Lauf der Jahre zu diesem Zweck erdachten Getrieben hat sich das in *Abb. 7* schematisch wiedergegebene am besten bewährt. Der aufgedrehte Gummistrang *G* betreibt zunächst die Rolle *R* von konischer Form, auf die ein Faden *F* aufgewickelt ist, der beim Aufziehen des Gummimotors vom dünnen zum dicken Ende der Rolle hin abgezogen wird; läuft der Gummimotor ab, dann wird der Faden anfangs (starke Gummispannung) auf den dicken Rollenteil (langer Hebelarm), gegen Ende (schwache Gummispannung) auf den dünnen (kurzer Hebelarm) aufgezogen, so dass bei geeigneten Rollendurchmessern der Fadenzug in jedem Stadium des Ablaufs völlig gleich bleibt. Damit ist zunächst für eine gleichbleibende Kraftquelle gesorgt. Der Flügelholm *H* ist durch eine Pleuelstange *P* mit einem Kurbelarm *K* verbunden; die Achse dieser Kurbel liegt quer zur Flugrichtung. Sie läuft im Fluge im Drehsinne nach vorne — oben —, hinten — unten um, so dass dadurch die Holme erstens auf- und abbewegt, zweitens aber, dazu

um 90° phasenverschoben, um ihre Längsachse hin- und zurückgedreht werden. Diese Kurbel ist an einer Platte *Pl* so befestigt, dass ihre Achse exzentrisch in der Plattenebene verläuft. Auf diese Wickelplatte wird der Faden *F* beim Aufziehen aufgewickelt. Der gleichmässige Zug des Fadens an der Platte im Fluge hat zur Folge, dass zunächst die ungünstige Kraftverteilung auf den Weg, die sich beim einfachen Modell (Abb. 6) so störend bemerkbar macht, völlig kompensiert wird; denn einem kurzen wirksamen Hebelarm der Kurbel *K* entspricht jetzt immer ein kurzer, einem langen immer ein langer Hebelarm *Hb* des wirksamen Fadenzuges *F*. Das Kraftmaximum liegt (da der Hebelarm des Flügelholms in der Wegmitte am längsten ist) in der Mitte des Schlagweges. Durch das Ausmaß der excentrischen

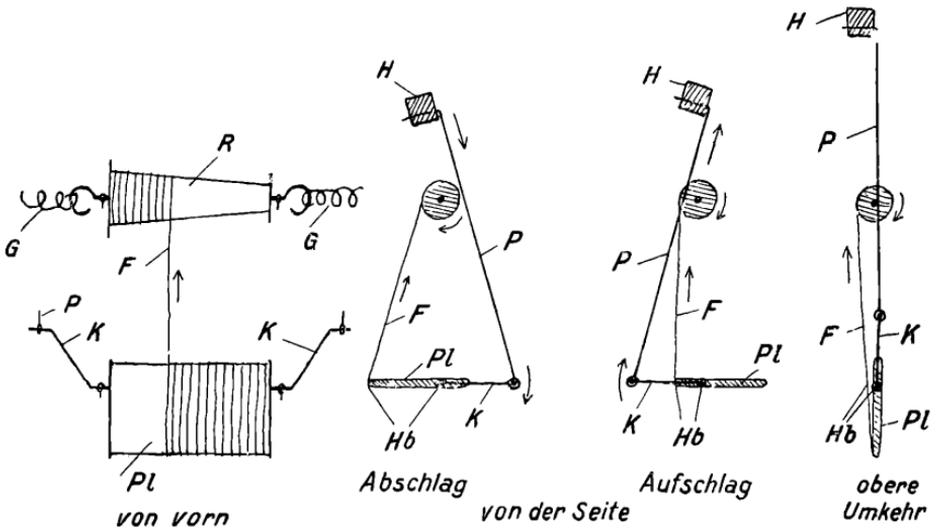


Abb. 7. Skizze des verwendeten Getriebes; Einzelheiten im Text Seite 427—428 432. (Die Pfeile geben die Richtung des Bewegungsverlaufs beim Ablaufen des Motors an.)

Lage der Platte hat man es überdies in der Hand, das Kraftverhältnis zwischen Ab- und Aufschlag nach Belieben zu gestalten. Soviel zum Grundprinzip des Getriebes.

Im folgenden ist nur eine bestimmte von vielen erprobten Bauausführungen, diese aber ganz genau beschrieben; (eine etwas abweichende Bauart wird anschliessend nur kurz erwähnt). Dadurch hofft der Verf. denen, die mit solchen künstlichen Vögeln Versuche anstellen wollen, nach Möglichkeit Umwege und erfolgloses Herumprobieren zu ersparen. Das betreffende Modell von 80 cm Spannweite

kann sowohl in grösseren geschlossenen Räumen (Hörsaal, Scheune) als auch im Freien bei stiller oder bewegter Luft zu Demonstrations- und Versuchszwecken benutzt werden. Es fliegt (in der hier angegebenen Grösse) aus eigener Kraft beim Start aus der Hand 25—30 Sekunden lang, was für die ausführliche Betrachtung bei weitem ausreicht. Nach dem gleichen Verfahren und in etwa gleichbleibenden Maßverhältnissen lassen sich auch viel grössere Vögel (solche mit 190 cm Spannweite sind mit bestem Erfolg erprobt worden) herstellen, die eine wesentlich längere Flugdauer und übertrieben geierartig langsame Bewegungen von grosser Schönheit zeigen. Doch empfiehlt es sich, auf alle Fälle mit kleineren Vögeln zu beginnen, an denen man zunächst den Umgang mit dieser etwas eigenwilligen Sorte von Tieren erlernt.

Das hier beschriebene Modell stellt sich nicht die Aufgabe, etwa einen bestimmten Vogel täuschend ähnlich nachzuahmen — was an sich gewiss reizvoll und garnicht übermässig schwierig wäre. Daher sind gewisse, nicht grundsätzlich wesentliche Bewegungsbestandteile (z. B. Herab- oder Zurückbiegung der Hand im Aufschlag), die häufig, aber nicht allgemein vorkommen, einfachheitshalber fortgelassen. Ebenso brauchte nicht einer vorgeschriebenen bestimmten Flügel-, Schwanz- oder Rumpfform gefolgt zu werden. Die Handschwinge sind fest zu einer Fläche geschlossen, doch lässt sich diese Hand schnell gegen eine andere mit einzelnen gespaltenen Handschwinge auswechseln (vgl. Abb. 11 a) und so der flugtechnische Unterschied zwischen beiden am sonst gleichen Modell sehr anschaulich vorführen.

Material und Bauweise.

Das Baumaterial ist, neben Stahldraht, Holz, Blech u. a. vor allem das beim Flugzeug- und Modellbau verwendete, äusserst leichte Balsaholz; für die Bespannung ist feines (aber beim Anblasen ganz oder nahezu luftundurchlässiges) Seidenpapier (Japanpapier) am besten geeignet. Der Motor besteht aus Fäden von gutem auf das 5—6fache der Ruhelänge dehnbarem Gummi. Einzelheiten sind in der nachfolgenden Materialliste aufgezählt:

Balsaholz von mittlerer Härte (Stücke bis zu 25 cm Länge)

Fichtenstäbchen, ca. 2 mm dick

gespaltene Bambusrohrstäbchen, 0,6—0,7 mm dick

feinstes Sperrholz, ca. 0,3 mm dick

Stahldraht von folgenden Stärken: 0,2 mm, 0,55 mm, 0,65 mm, 1,25 mm

Uhrfederstahl, ca. 1,8 mm breit, 0,25 mm stark

Duraluminiumblech, 0,4 mm stark (oder Messingblech 0,2 mm)

feines Japanpapier (oder Bespannpapier für Saalflugmodelle)

Seidenfaden (am besten medizinische Nähseide), von etwa 0,3 mm Dicke, Zerreihsfestigkeit ca. 1 kg

Verbandmull, Strohrinkhalme, Gummifaden am besten von 1 mm Dicke, Rudolleim (oder ein anderer schnelltrocknender Cellonleim), Syndetikon (oder Dextrinleim), Maschinenöl.

An Hilfsmitteln ist neben dem üblichen: Zangen, Schere, Feile, Messer, Sandpapier auch eine Löt einrichtung erwünscht, aber nicht unumgänglich nötig.

Bei der Herstellung der Teile (Abb. 8 u. 9), die sehr sorgfältig geschehen muss, geht man am besten in folgender Reihenfolge vor: zunächst werden 2 gleiche Rollen R (Abb. 8) aus Balsaholz mit einer Achse aus 0,5 mm Stahldraht gefertigt. Dazu biegt man den Draht in der Mitte S-förmig und leimt ihn mit Rudol in ein mitten aufgespaltenes Holzpflockchen geeigneter Grösse, das nachträglich in drei Dickenstufen rund gefeilt wird¹⁾; kleine Endscheiben aus dünnstem Sperrholz werden seitlich aufgeleimt, danach erst die Achse in der angegebenen Form als Haken für die Gummistränge gebogen. Am Schluss werden einige kleine Stiftchen S von 0,25 mm-Draht in die Stufenkanten gedrückt (damit der Aufziehfaden nicht abrutscht) und die Oberfläche der ganzen Rolle durch gleichmässigen Ueberzug mit einer Rudolschicht gehärtet.

Ganz entsprechend wird die Wickelplatte Pl aus 2 Balsaholzbrettchen mit zwischengeleimter Achse von 1,25 mm Stahl hergestellt; die beiden Brettchen werden mehrfach quer durchbohrt und mittels durchgesteckter, eingeleimter Balsastäbchen „vernietet“. Die Abbiegung der Kurbel K erfolgt in der Plattenebene; an der endständigen Biegung wird ein dicker Löttropfen aufgesetzt, der später das Wegrutschen der Pleuelstange Pl verhindert.

Danach wird der Getrieberahmen R aus Balsaholz geleimt, dem oben innen 2 kleine Querbalken aufgeleimt werden, die Träger der beiden Rollen sind. Durch kleine Löcher an den vier Kanten wird rechts und links je ein über der Flamme schon etwas vorgebogener feiner Bambusstab B von 0,6—0,7 mm Dicke von vorne her so durchgesteckt und verleimt, dass die vorgeschriebene Biegung entsteht; die nach hinten stehenden Enden werden in ein kleines Balsaholzpflockchen Pf verleimt, in das hinterher ein Loch zur Aufnahme des Schwanzstabes SW (Abb. 9) gebohrt wird. Durch den unteren Teil des Pflockchens Pf ist ein 0,5 mm Stahldraht St₁ quer durchgesteckt, der an den Enden hakenförmig gebogen ist, ein entsprechender (St₂) ist vorne mit dünnem Faden aufgebunden und mit Rudol fest verleimt. Seitlich wird in den Getrieberahmen R ein kleines gekrümmtes, in der Mitte mit einem Loch versehenes Blechstückchen (Dural 0,4 mm oder Messing 0,2 mm) Be eingesetzt und verleimt, als Lager, in das später ein Stift S am inneren Flügelholm Hi hineinpassen muss.

Die Lager für die Achsen der Rollen und für die Wickelplatte im Rahmen werden an den bezeichneten Stellen im Holz weitleumig vorgebohrt und dann Holzwanne und Löcher mit Rudol verstrichen, nach Austrocknen des Leims wird noch einmal genau nachgebohrt, so dass die Achsenlager aus hartem Leim bestehen. Durch seitliche Spalten, die nachher verleimt werden, schiebt man Rollen und Platte in die Lager ein; sie müssen leicht und ohne Wandreibung (aber nicht zu locker) sich in den Lagern drehen können. Man achte darauf, dass die dicken Rollenden der weniger breiten Plattenseite gegenüberliegen.

1) Die konische Rollenform ist deshalb weniger geeignet, weil der Wickelfaden leicht zum dünnen Ende hinrutscht.

Damit ist das „Rumpfskelett“ im groben fertig; wir wenden uns den Flügeln zu. Der sich zum Flügelende hin verjüngende Flügelholm aus Balsaholz ist in einen inneren oder „Armteil“ *Hi* und einen äusseren oder Handteil *Ha* zerlegt, beide werden durch ein elastisches „Handgelenk“ verbunden. Dazu ist ein Federstahlstück von 0,25 mm Dicke an der oberen Vorderkante des Armteils *Hi* mit Rudol aufgeleimt und durch dünnen Faden fest verbunden; nach Trockenwerden des Leims wird das herausragende Ende des Stahlblechs befettet und ganz entsprechend am Handholm *Ha* eingeleimt und verbunden, jedoch, wenn der Leim fast hart ist, mit einem Ruck heraus gezogen. Dadurch gewinnt man ein genau passendes Lager und kann Hand- und Armteil des Flügels voneinander lösen und leicht den Handfittich gegen einen anderen auswechseln. Am Schultergelenk ist der Armteil des Holms *Hi* zugespitzt und durch einen Spalt ein 0,5 mm Drahtstift *S* eingeschoben und fest eingeleimt. Dieser Stift sitzt später im Loch des Blechs *Be*, wo er nach oben und unten leicht beweglich und drehbar sein muss: ein vereinfachtes Kugelgelenk. Das basale, zugespitzte Ende des Holms *Hi* wird durch Rudol gut gehärtet.

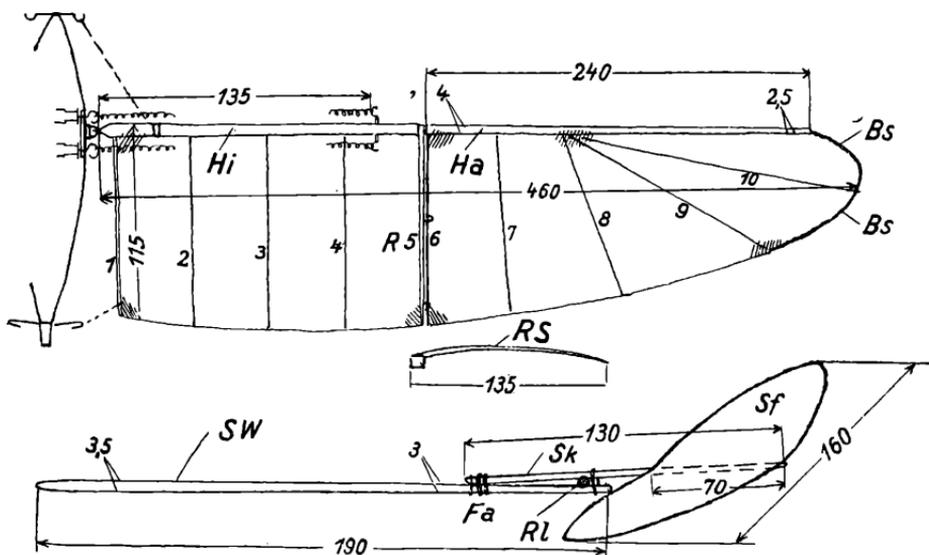


Abb. 9. Fortsetzung von Abb. 8. Erläuterung im Text S. 432—433.

Dem Holm *Hi* ist ferner noch ein 4 mal rechtwinklig gebogenes Führungsblech *Fb* aus Duraluminium (oder Messing) mit zwei Löchern aufgesetzt und fest verleimt: das Gelenk für die Pleuelstange *P*, die knapp hindurch passen muss. Schliesslich trägt der Holm *Hi* noch ein kleines Balsastäbchen *Bs*, das senkrecht zur Holmlängsachse, aber im Querschnitt schräg von hinten-unten nach vorn-oben durchgesteckt ist, und das als Stütze für einen 0,5 mm Stahldraht *D* dient, der, an beiden Enden zum einfachen Haken gebogen, später die (andererseits an den Rollen eingehängten) Gummistränge trägt. Der Gummi verläuft also vor und hinter dem proximalen Drittel des Flügelholms.

Die Flügelfläche wird beim Armteil von 5 Rippen (1—5) getragen, von denen allein die Rippe R 5, die aus an der Basis etwa 2 mm dickem Fichtenholz besteht, fest im Holm Hi eingeleimt ist, während die übrigen Rippen 1—4, die am besten erst nach Aufleimen des Papiers angesetzt werden, mit dem Holm gelenkig (nicht festgeleimt, sondern nur durch ein Stückchen Mull oder Gaze) verbunden sind. Rippe 1 besteht aus einem 0,6 mm Bambusstab, 2—4 aus dünnerem Bambus oder leicht gewölbten gespaltenen Strohrinkhalmen. Aus diesem Material bestehen auch die Rippen 7—10 des Handteils; Rippe 6 ist aus einem feinen, nicht gewölbten Bambusspan von 0,5 mm Dicke; durch ein nach oben gebogenes Häkchen an der Mitte und ein nach unten gebogenes nahe dem Ende der Rippe 5 wird Rippe 6 gefasst und ihr zugleich die Wölbung von Rippe 5 aufgezungen. Die Rippen 9 u. 10 bleiben ungewölbt, das Flügelende ist also eben. Das äusserste Flügelende ist von einem in die Spitze des Holmes Ha eingeleimten dünnen Bambusspan von etwa 0,4—0,5 mm Dicke gestützt; man verwende für beide Flügel Späne von genau gleicher Dicke und Elastizität.

Mittels Syndetikon (oder Dextrinleim) wird feines Japanpapier (oder Saalflugmodellpapier) von oben über den Armteil und über den Handteil des Flügels vorsichtig, unter Vermeidung von Falten oder Spannungen, aufgeleimt; zum Schlusse werden die durch Schraffur gekennzeichneten Stellen, die leicht einreissen, durch mit Syndetikon aufgeleimte Mullstückchen verfestigt. Der fertige, aus beiden Teilen zusammengesetzte Flügel darf, wenn man den Holm senkrecht nach oben hält (ausser der Rippenwölbung), keine Krümmungen oder Verwindungen zeigen.

Die Herstellung des Schwanzes ist einfach. Er besteht aus einem längeren Stab Sw (Abb. 9), an dessen Ende ein kürzerer Sk mit seinem Vorderende durch einen verleimten Faden Fa festgemacht ist, dahinter ist ein kleines Klötzchen Kl eingeklemmt, hinter dem ein Gummifaden beide Stäbe umzieht. Durch Vor- oder Zurückschieben des Klötzchens Kl wird der Schwanz mehr oder weniger aufgerichtet. Die Schwanzfläche selbst ist auf einen elliptisch gebogenen, dem kleinen Stab Sk aufgeleimten Bambusspahn von etwa 0,6 mm Dicke geklebt. Man kann natürlich auch einen in der Skizze 10 a angedeuteten, mehr „vogelähnlichen“ Schwanz wählen, dessen Gelenk dann nahe der Schwanzwurzel liegen muss. Das Gewicht des fertigen bespannten Rumpfes beträgt 8 g, das beider Flügel 7 g, der Schwanz wiegt 1,3 g, der Gummimotor 4 g; Gesamtgewicht 20—21 g.

Flugfertigmachen und Aufziehen.

Nach Fertigstellung der einzelnen Bauteile wird alles zusammengesetzt. Dazu wird zunächst auf jede der beiden Rollen ein Seidenfaden (Zerreissfestigkeit 1 kg) von etwa 200 cm Länge aufgewickelt, der am dicken Rollende aufgeknötet und verleimt ist und gleichmässig nach dem dünnen zu aufgedreht wird; und zwar geschieht das bei beiden Rollen gegensinnig, so dass die Fadenenden wie in Skizze 10 c herabführen, wo sie zunächst um den dicken Teil der Wickelplatte geschlungen und vorläufig dort verknötet werden.

Danach werden die beiden Flügel in ihr Schultergelenk eingesetzt und zugleich auch die jederseits zwei Gummistränge eingehängt, die die Flügel im Gelenk festhalten. Jeder dieser Gummistränge (aus je nach deren Dicke verschiedener

Zahl von Einzelfäden bestehend) hat eine Länge von 13 cm und ein Gewicht von 1 g. Die Stränge werden zunächst am Haken der Wickelrolle eingehängt, dann ca. 10—15 mal in demjenigen Drehsinn aufgedreht, der den von der Rolle zur Platte ziehenden Faden straff zieht, und dann am Holmhaken D eingehängt. Danach wird die schon zuvor auf die Kurbel K aufgesetzte Pleuelstange P, die durch einen zweiten Lötropfen am Kurbelende auf ihrem Lager festgehalten ist, mit dem rechtwinklig gebogenen oberen Ende von hinten her durch das Führungsblech Fb gesteckt. Ein dünner Gummifaden (1 mm) wird oben um die Pleuelstange dicht unterhalb des Knicks geknotet, nach aussen (distal) um das Führungsblech und über das hervorstehende Ende der Pleuelstange hinweg zum gleichseitigen Haken des Stahlstäbchens St_2 geleitet und dort so befestigt, dass der Gummifaden bei richtiger Stellung des Flügels (Skizze 10) etwa auf doppelte Länge gedehnt ist. Der nun durch den Gummifaden stark nach vorne gezogene Flügel wird mittels eines an der hinteren proximalen Flügelkante aufgeleimten Seidenfadens, des Spannfadens, der zum Drahtstäbchen St_1 führt, soweit zurückgeholt, bis in der Aufsicht von oben die im Schema 10 a skizzierte Flügelstellung erreicht ist. Die Stellung des Flügels ist damit einmal durch diese Verspannung nach vorne und hinten, zum zweiten durch die Fixation an der Kurbel über die Pleuelstange festgelegt (vgl. Skizze 10 d—g). Freiheiten sind nur darin gegeben, dass einmal der ganze Flügel nach hinten ausweichen kann, was ein praktischer Gesichtspunkt für das Fliegenlassen im geschlossenen Raume ist, denn so wird beim Aufprall ein Bruch meist sicher vermieden. Zweitens kann wegen der Elastizität des „Handgelenks“ die Fläche des Handfittichs je nach der Anströmungsrichtung elastisch nach unten oder oben ausweichen. Dabei wölbt sie sich der Anströmung jeweils konkav entgegen, — der Segelfläche eines Schärenkreuzers vergleichbar — was dadurch möglich wird, dass die äusseren Rippen mehr und mehr parallel zum Flügel verlaufen (vgl. auch das S. 417 über den Rüttelflug des Kolibris gesagte)! Das Ausmass dieser Flächenelastizität ist regulierbar, da man durch Biegen des Uhrfederblechs am Handgelenk der Fläche grössere oder geringere Spannung geben kann; für den Anfang wird es um etwa 20° nach vorn gebogen.

Es wird vielleicht manchen wundern, dass wir den Flügel in einer Ebene und nicht auf einer flach elliptischen Bahn schwingen lassen. Das letztere ist an sich leicht zu erreichen, man braucht dazu nur den hinteren Spannfaden durch einen Gummifaden zu ersetzen und dafür den Flügel durch einen Seidenfaden nach vorne zu ziehen, der am Querstab St_2 und andererseits mehr oder weniger unterhalb des rechtwinkligen Knickes an der Pleuelstange befestigt ist. Die Flügelspitze geht dann auf einer (je nach Wunsch schmaleren oder breiteren) Ellipse nach vorn — unten — hinten — oben. Ein aerodynamischer Nutzen gegenüber der Schwingbewegung in einer Ebene ist nicht erkennbar; bis auf ein gewisses störendes Drehmoment um die Querachse zeigt sich keinerlei Unterschied. Der wesentliche, (aber nicht einzige) Sinn des elliptischen Flügelspitzenweges bei vielen Vögeln ist schon oben besprochen (S. 424).

Völlig abwegig sind beliebte physikalische Ueberlegungen derart, dass die Bewegung auf elliptischer Bahn „leichter“ sei, weil dabei der Flügel nicht, oder weniger, gebremst zu werden brauche, also geringere Massenbeschleunigungen und Beanspruchungen aufträten. Für die auftretenden Kräfte und Beschleunigungen

in einer Ebene ist es natürlich belanglos, ob auch noch (*ceteris paribus*) Bewegungen senkrecht zu dieser Ebene erfolgen oder nicht¹⁾. — Doch zurück zu unserem Modell! Das Rumpfskelett wird erst jetzt, und zwar zunächst unter Offenlassen einer Seite, mit Japanpapier bespannt. Nachdem man sich überzeugt hat, dass die Flügel in jeder Stellung der Kurbel ganz symmetrisch stehen (Betrachten von vorne her!), zieht man das Modell probeweise ein Stück auf. Dazu wird der Getrieberahmen oben und unten (von vorne her) mit der linken Hand ergriffen, während Daumen und Zeigefinger der rechten gegen beide Kurbelenden K der Wickelplatte von rechts und links fassen und die Kurbel zunächst 10—20 mal (bei Betrachten von der linken Seite her im Gegensinne des Uhrzeigers) herumdrehen. Der Vogel wird nun auf den Rücken gedreht und wie bisher mit der linken Hand frei gehalten, wobei jetzt nach Loslassen der Kurbel die Flügel gleichmäßig und fest, aber ohne zu knacken oder an bestimmten Stellen stehen zu bleiben, schlagen müssen.

Klappt das ordnungsgemäß, dann zieht man mehrmals hintereinander und weiter auf (40—50 Umdrehungen) und beobachtet, ob der Faden sich beim Abrollen schön gleichmäßig wieder von der Platte auf die Rollen zurückwickelt, ohne an dem einen oder anderen Ende ein dickes Knäuel zu bilden (im letzteren Falle stehen Platten- und Rollenachse nicht genau parallel). Schliesslich werden alle Gelenke und Lager geölt und die einzelnen Gummistränge (nach Abnahme

1) So meint z. B. auch STOLPE (Beiheft zum Kolibrifilm), die hohe Schlagfrequenz des Kolibris „erkläre“ sich mit der (notabene sehr flachen) 8-förmigen Bahn der Flügelspitze, wodurch ein „Totpunkt“ vermieden sei. Diese „Erklärung“ erklärt garnichts; wenn man überhaupt bei hohen Schlagfrequenzen nach Erklärungen suchen will, die ausserhalb des neuromuskulären Systems selbst liegen sollen, dann könnte höchstens noch ein Prinzip der „Resonanz“ (Abstimmung der elastischen Eigenschaften des Systems auf dessen Massenträgheit) herangezogen werden, durch das etwaige, durch Massenträgheit der Flügel bedingte, zusätzliche Reibungskräfte auf ein Minimum herabgedrückt werden können. Dass bei manchen, sehr hochfrequent schlagenden, kleinflügeligen Insekten solche abstimmbare Resonanzen eine Rolle spielen werden, ist mir sehr wahrscheinlich. Die 8-förmige Flügelbahn hat damit jedoch nichts zu tun; sie rührt beim Kolibri wohl daher, dass die Flügel jeweils beim Schlagbeginn etwas elastisch in Richtung der angreifenden Luftkräfte, also nach oben, ausweichen. — Wenn man übrigens bei rein technischen Ueberlegungen zum Schluss kommt, dass für menschliche Zwecke rotierende Bewegungen den schwingenden vorzuziehen sind, so geben hier immer konstruktive Dinge den Ausschlag. Es ist kein Zufall, dass sich in der Technik auch dort, wo es sich um ähnliche Probleme handelt, wie sie die Vogelschwinge löst, immer Bewegungen auf einer Kreisfläche — Luftschraube — oder auf einem Zylindermantel — Voit-Schneider-Propeller — durchsetzen. Denn bei solchen Bewegungen fällt das weg, was die tierische Flügelbewegung kompliziert macht: die periodische Verwindung längs des Flügels und (beim Voit-Schneider-Propeller) die Unterschiede der Anströmrichtung in den einzelnen Flügelschnitten. Dass aber andererseits gerade diese Komplikationen es sind, auf die der ganze Vogelflug sich gründet, wird hoffentlich aus diesem Aufsatz deutlich geworden sein.

vom Holmhaken) soweit aufgedreht, dass der verkehrt (Rücken nach unten) gehaltene Vogel bis zum letzten Flügelschlag gut durchschlägt und nicht vorher schon „ermattet“. —

Nur kurz sei noch eine andere bewährte Ausführung des Getriebes erwähnt, die zwar eine noch grössere Präzision der Herstellung verlangt (also für den Anfang weniger zu empfehlen ist), die aber für gewisse Zwecke Vorteile hat, so

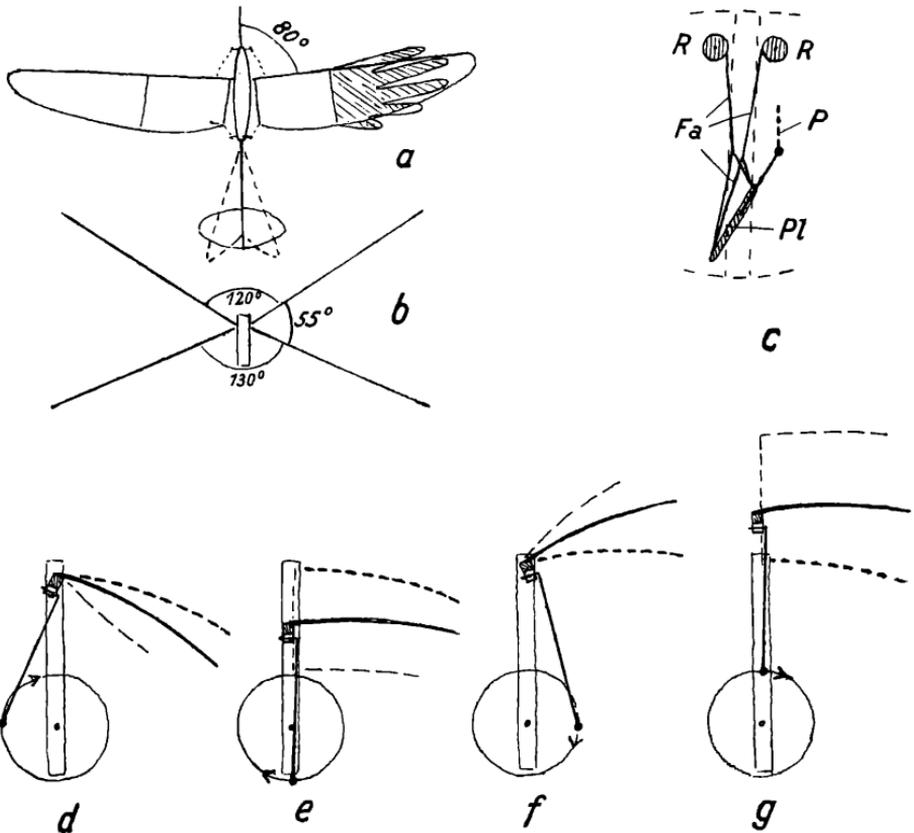


Abb. 10. a zeigt die Flügelstellung in Aufsicht von oben, b den Schlagwinkel, c die Befestigung der Seidenfäden (Fa) an der Wickelplatte (Pl), d—g veranschaulichen verschiedene Stellungen der Kurbel und damit der Pleuelstange und des Flügelholmes; dabei sind jeweils drei zugehörige Flügelschnitte: am Rumpf (dicke unterbrochene Strichführung), in Flügelmitte (ausgezogen) und an der Flügelspitze (feine, unterbrochene Strichführung, letztere für den Fall des Geradeausflugs), angedeutet.

z. B., wenn man einen mit hoher Flächenbelastung, also bei höheren REYNOLDS'schen Zahlen schnell fliegenden Vogel bauen und deshalb einen möglichst schlanken Rumpf haben und die Aufhängung der Gummistränge aussen am Flügel vermeiden will; (bei kleiner Re-Zahl ist solch ein turbulenzzeugender Strang ja nicht nur unschädlich, sondern u. U. sogar von Nutzen, vgl. S. 411).

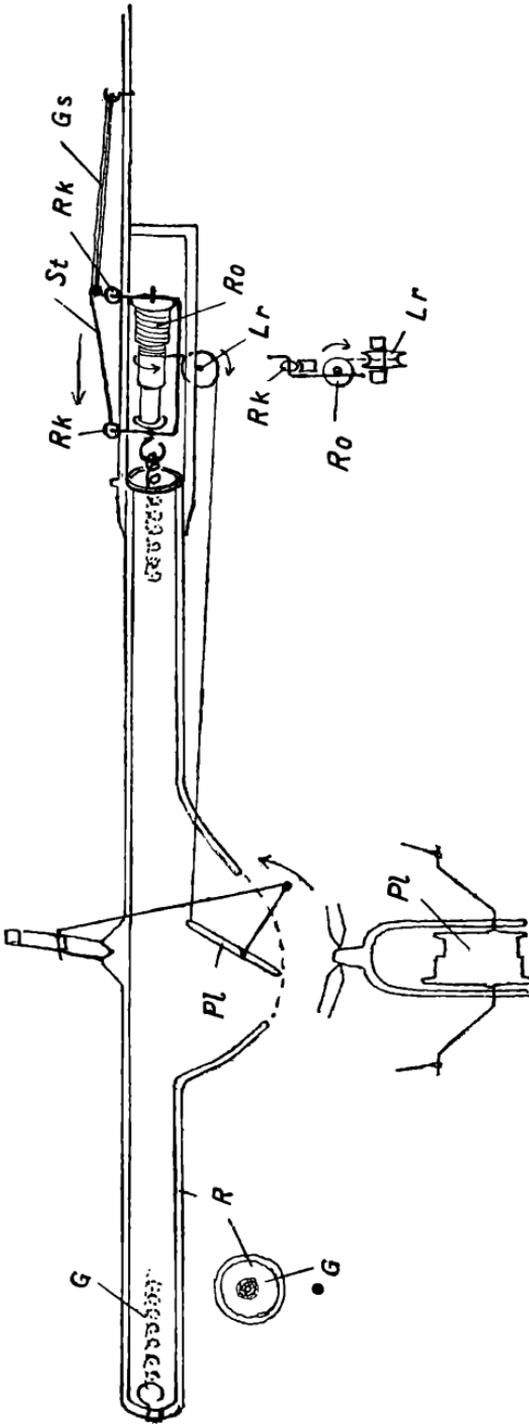


Abb. 11. Skizze eines Getriebes anderer Bauart; Beschreibung im Text S. 498.

In diesem Fall (Skizze 11) wird der nur in Einzahl vorhandene, entsprechend dickere und längere Gummistrang G in einem Balsaholzrohr R untergebracht, das zugleich den Rumpf darstellt. Dieses Rohr ist in seiner mittleren Strecke nach unten offen und trägt dort, wie üblich, die Wickelplatte Pl; über dieser Stelle ist der Ansatzpunkt der Flügel. Hinten ist die Rolle Ro in einen Stahlrahmen St eingehängt, der seinerseits auf kleinen Rollen Rk (z. B. Glasperlen) vor- und zurückgleiten kann. Der Seidenfaden läuft über ein kleines Laufrad Lr aus Balsaholz mit Achsenlager aus Duraluminium zur Wickelplatte. Der Rahmen St wird durch einen Gummistrang Gs von passender Dicke schwanzwärts gezogen; beim Aufziehen spannt sich der aufgedrehte Gummimotor G zunehmend, wobei der Rahmen mit der Rolle langsam nach vorne gleitet. Beim Fluge wird umgekehrt die Rolle allmählich in ihre Ausgangslage zurückgezogen, wodurch erreicht ist, dass der Seidenfaden sich in gewünschter Weise gleichmässig auf die Rolle zurückwickelt, zuerst auf das dicke, zum Schluss auf das dünne Ende.

Diese kurze Beschreibung sei hier nur für besondere Interessenten eingeschoben. Die folgenden Bemerkungen gelten wieder für das ausführlicher beschriebenen Vogelmodell.

Einfliegen und mögliche Fehler.

Während des ganzen Einfliegens und Erprobens bleibt der Rumpf auf einer Seite offen, damit man die Getriebeteile deutlich vor Augen hat. Erst wenn alles nach Wunsch geht, wird der Rumpf ganz bezogen und nur oben und seitlich kleine Spalten zum Hineinschauen gelassen.

Der aufgezogene Vogel, in der Hand umgekehrt (Rücken nach unten) gehalten, muss ausdauernde, im Abschlag kräftige Flügelschläge ohne zu stocken und ohne merklich an den Umkehrpunkten zu knacken, bis zum Schluss (d. h. zum Fadenende) durchführen. Die Kraft der Flügelschläge ist dabei nicht völlig übereinstimmend, weil es immer beim Uebergang des Fadens von einem Rollendurchmesser zum nächstkleineren eine merkliche Steigerung gibt. Doch das ist für unsere Zwecke kein Fehler, sondern erhöht sogar den reizvollen Eindruck des „Lebendigen“. Wenn die Bewegung offensichtlich frei von Störungen vor sich geht, zieht man den Vogel etwa halb auf und lässt ihn, zunächst vorsichtshalber mit nicht zu wenig aufgerichtetem Schwanz, fliegen. Geht er dabei gleich mit dem Kopf nach unten, so muss der rechtwinklige Knick oben in der Pleuelstange einen etwas grösseren Winkel erhalten, ferner die Flügel noch ein wenig vorgezogen (geringes Verlängern des hinteren Spannfadens) und ausserdem evtl. mehr Höhensteuer gegeben werden. Geht er, was die Regel ist, im Bogen nach oben, um dann rüttelnd abzusinken, so hat er zuviel Höhensteuer, vielleicht auch eine zu stark oben abgeknickte Pleuelstange. Die richtige Knickung der Pleuelstange ist dann erreicht, wenn der ganze Flügel am oberen Umkehrpunkt bei Betrachtung von der Vorderkante her und bei senkrechter Stellung des Vogels (Schwanz nach unten) nicht verwunden ist.

Erfolgt der Flug gleichmässig und leicht ansteigend, dann ist alles in Ordnung und es bleibt nur noch übrig, die Gleitflugeinstellung zu richten. Dazu müssen wir beide Seidenfäden in bestimmter unverrückbarer Weise an der Wickelplatte befestigen. Da der Vogel bis zum letzten Flügelschlag durchschlägt und auch

jetzt noch ein gewisser Fadenzug übrigbleibt, weil die Gummistränge etwas „Vorspannung“ besitzen, so kann man durch entsprechende Befestigung der Fäden eine bestimmte Endstellung der Platte und damit der Flügel erzwingen. Abb. 10c deutet das an; die richtige Stellung, bei der der Vogel gleichmäßig und in nicht zu steilem Winkel herabgleitet, liegt nahe dem oberen Umkehrpunkt der Flügel, gewöhnlich im ersten Beginn des Abschlags. Die genaue Stellung muss erprobt und danach der Faden auf der Platte verleimt werden. Das Einfliegen ist damit beendet und wir können jetzt untersuchen, was unser Vogel nun eigentlich alles kann. Zuvor aber, da nicht immer das Einfliegen so glatt geht, seien die *Ursachen einiger häufig vorkommender Fehler* kurz besprochen:

1.) Die Flügel bleiben im Fluge an bestimmter Stelle (z. B. am oberen oder unteren Umkehrpunkt) stehen: die Gelenke klemmen (Schultergelenk!); die beiden Kurbelarme stehen nicht so zur Wickelplatte, dass der Flügelumkehrpunkt mit dem kürzesten wirksamen Hebelarm des Fadenzuges an der Platte zusammenfällt.

2.) Die Flügel machen an den Umkehrpunkten ein hart knackendes Geräusch: dazu gilt auch das eben über die Kurbelarme Gesagte, ferner sind die einzelnen Gelenke und Lager zu locker; sie dürfen nur gerade soviel Freiheit haben, dass nirgends etwas klemmt; die Wickelplatte ist zu dick.

3.) Der Vogel stürzt zwar nicht kopfüber ab, will aber nicht steigen, schlägt nicht kräftig genug: allgemeine Reibungen im Getriebe.

4.) Der Vogel saust mit übermäßiger Schlagfrequenz los: etwas zuviel Gummi im Motor, zuviel Vorspannung; schlechte Verteilung des Seidenfadens auf den Rollen.

5.) Der Vogel legt sich immer auf eine Seite und stürzt über einen Flügel ab (er „schmiert ab“): die Flügel stehen nicht genau symmetrisch; das eine Flügelende ist vielleicht elastischer (dünnerer Bambusspan am Flügelende) als das andere; die Flügel sind von ungleichem Gewicht oder haben sich bei der Beanspruchung ungleich verzogen.

6.) Der Vogel fliegt um seine Längsachse sehr labil, stürzt leicht über den, einen oder anderen Flügel seitlich ab: die Flügel schlagen zu weit nach unten zu wenig nach oben aus (vgl. Skizze 10b).

7.) Der Vogel fliegt bei mäßig kräftigen Flügelschlägen gut geradeaus, bei kräftigeren Schlägen kippt er nach vorne ab: die Flügel schlagen zu hoch nach oben aus (der Vortrieb der Flügelenden zieht gleichsam an einem zu hohen Punkt; vgl. Skizze 10b).

8.) Der Vogel ist sehr labil um seine Querachse, neigt dazu, bald sich zu steil aufwärts zu stellen, bald nach vorne abzustürzen: zu geringer Anstellwinkelunterschied zwischen Armteil des Flügels und Schwanzfläche; etwas mehr Höhensteuer geben und zugleich die Flügelfläche durch Verkürzen des Spannfadens etwas zurücknehmen (Schwerpunktverlagerung nach vorne).

9.) Der Vogel fliegt, trotz symmetrischer Flügelstellung in der Ruhe, immer eine enge Kurve: das in der Kurve äussere Flügelende ist stärker elastisch als das andere, gibt mehr Vortrieb.

Einige Beobachtungen und Erfahrungen am künstlichen Vogel.

Wie eingangs erwähnt, ist es nicht Zweck dieses Aufsatzes, das ganze vorhandene Material von Beobachtungen und Untersuchungen an Vogelmodellen hier vorzulegen; das muss einer späteren Zeit vorbehalten bleiben. Nur das, was uns das Vogelmodell ohne weiteres lehrt und sichtbar macht, sei kurz besprochen. Das meiste davon wird auch schon ohne Hilfe von Film oder Momentaufnahme deutlich; Augenblicksbilder, wie sie Tafel XVII für verschiedene Stellungen wiedergibt, leisten natürlich gute Dienste, zumal auch in Fällen, wo man hinter einen noch nicht erkannten Flugfehler kommen möchte.

Allgemeine Stabilität. — Es war auch für mich selbst sehr überraschend, dass ein gut eingeflogener, künstlicher Vogel sich im freien Gelände bei stärker bewegter Luft ebenso benimmt wie etwa eine Krähe in turbulentem Sturm, indem er in manigfacher Weise auf die Seite, hoch- und herabgeworfen wird, dabei offenbar vorübergehend das Gleichgewicht verliert, es aber regelmäßig sofort wiedergewinnt. Das war nicht sicher vorauszusehen; denn im Schwingenflug wechseln ja labile Fluglagen (Flügelstellung unter dem Massenschwerpunkt) und stabile Fluglagen miteinander ab; das Entscheidende ist aber eben, dass im Mittel stabile Zustände überwiegen und dass die Ungleichgewichte jeweils von zu geringer Dauer sind, als dass dabei (auch in Böen) irreparable Störungen auftreten können. Wir lernen daraus, dass auch bei den Vögeln schon die bloße mechanische Stabilität sehr viel mehr leistet, als man zunächst annehmen sollte. Die hochentwickelten (und erst ganz im Groben bekannten) Gleichgewichtsreflexe treten erst in besonderen Fällen entscheidend auf den Plan, so z. B. beim Fliegen ohne Schwanz, was, zumal bei langsam schlagenden Formen, immerhin ein aequilibristisches Kunststück ist, das mit meinen Vögeln nachahmen zu können ich die Hoffnung ziemlich aufgegeben habe ¹⁾.

Für diese mechanische „Autostabilität“ ist natürlich in erster Linie wichtig, dass der Massenschwerpunkt im Mittel etwas unterhalb der Verbindungslinie der Schwerpunkte der tragenden Vertikalkraft beider Flügel (Druckpunkte) liegt. Daneben gilt hier, genau wie auch

1) Nurflügelmodelle (s. z. B. Abb. 12 in v. HOLST und KÜCHEMANN, Biologische und aerodynamische Probleme des Tierflugs; Naturwiss. 29 (1941) S. 358) ohne besondere Schwanzfläche lassen sich zwar bauen, dann muss aber wenigstens die rumpfnaher Flügelfläche fledermausartig etwas nach hinten ausgezogen werden, sonst ist eine Stabilität um die Querachse schwer zu erzielen.

für Flugzeuge, die Regel, dass — ebenfalls wieder im Mittel — der Winkel, den der tragende Armteil der Flügel mit der Schwanzfläche nach oben einschliesst, etwas kleiner sein muss als 180° . Damit wird es leicht verständlich, dass der Vogel, so bald etwa eine Bö von vorn kommt, sich etwas aufrichtet und steigt (genau so wie auch der Horizontalflug bei stärkeren Flügelschlägen und folglich grösserer Geschwindigkeit ohne weiteres in Steigflug übergeht), während bei Böen von hinten (relative Geschwindigkeitsverlangsamung) der Vogel vorübergehend sich nach vorn neigt und herabkommt, um sich mit der damit einhergehenden erhöhten Geschwindigkeit wieder aufzufangen. Bei Windstössen von der Seite steigt von selbst die tragende Kraft des Flügels auf der Windseite, der Vogel stellt sich schief (die Windseite wird gehoben) und geht infolgedessen gewöhnlich in eine Kurve, die ihn von der Böenseite fortwendet.

Horizontalflug, Steigflug, Rüttelflug. — Der blosse Augenschein lehrt schon, dass im Horizontal- oder sanften Steigflug der Rumpf auf einer nahezu gradlinigen Bahn sich fortbewegt; die so wichtige Ausgangsbedingung, dass der Schwerpunkt keine vertikalen Pendelbewegungen machen soll, ist also (wenn man berücksichtigt, dass ja auch die Flügel ein gewisses Gewicht besitzen) völlig verwirklicht. Aus den Bildern der Taf. XVIII ist deutlich zu ersehen, dass der steigende Vogel auch beim Aufschlag Höhe gewinnt. Dass der Horizontalflug unseres Vogels dem Schema Abb. 4b folgt, ersehen wir deutlich aus einer genaueren Betrachtung der Filmbilder von Taf. XVIII u. XIX und der Einzelbilder von Taf. XVII. Wir bemerken, dass beim Abschlag der Flügel von der Wurzel bis zur Spitze stark verwunden ist (Taf. XVII, 1b—d). Die Verwindung ist bei mit grösserer Kraft ausgeführtem Steigflug (Taf. XVII, 1b), besonders an den elastischen Flügelenden, sehr stark. Der Handteil des Flügels ist dabei segelartig gewölbt. Im Aufschlag ist der Flügel im ganzen ziemlich steil aufgerichtet (Taf. XVII, 2a u. b) und weniger stark verwunden; bei entsprechender Blickrichtung (Taf. XVII, 2b) erkennt man aber deutlich, dass das Flügelende im Vergleich zur Flügelmitte doch etwas nach unten verwunden ist, was beweist, dass die Flügelspitze tatsächlich von oben her angeströmt wird. Dies lässt sich also mit einer gradlinigen Bahn des Massenschwerpunkts sehr wohl vereinigen!

Wenn wir bei unserem Vogel einen möglichst schnellen Geradeausflug mit relativ grossem Fortschrittsgrad erreichen wollen, dann müssen wir die Elastizität des „Handgelenks“ sehr klein machen (nach

vorn-oben-Biegen der Stahlfeder) und für kräftige Flügelschläge sorgen (Seidenfaden überwiegend auf der dünnen Seite der Rollen aufwickeln), dabei wenig Höhensteuer geben. Wir kommen dann in die Nähe des Schemas 4c, ohne allerdings den Fortschrittsgrad von 3 zu erreichen. Machen wir andererseits den Handteil des Flügels sehr elastisch, dann erhalten wir geringere Fortschrittsgrade und höhere Schlagfrequenzen und können dem Vogel erhebliche Steigungen zumuten. Bei genügender Stärke der Schläge kann man immerhin einen Steigflug von über 40° leicht erreichen.

Auch Rütteln kann unser Vogel bei genügender Nachgiebigkeit der Handschwingenfläche (grosser, passiver Drehschwung). Dazu werden wir ihm aber nicht einen unvornehmen (weil Energie verschenkenden) Schwanzausschlag nach oben geben — das tun bekanntlich auch die Vögel nicht, — sondern durch Nachlassen der hinteren Spannfäden die Flügel mehr nach vorne rücken, d. h. den Schwerpunkt nach hinten verlegen. Bei geeignet abgepasster Schwerpunktlage rüttelt der Vogel nun mit einer Schräglage des Rumpfes von etwa $30\text{--}45^{\circ}$ auf der Stelle. Bei stärkeren Flügelschlägen steigt er rüttelnd sehr steil, u. U. senkrecht empor.

Dass bei der hier vorgegebenen Kraftverteilung und der eigentlich zu geringen Drehschwung der rumpfnahen Flügelzone ein Rütteln überhaupt möglich ist, erscheint zunächst verwunderlich. Allerdings sei gestanden, dass es auch — wie bei vielen grossen Vögeln — nicht gerade das Ideal eines Rüttelflugs ist; denn am Armteil reisst die Strömung natürlich (wie bei diesen Vögeln auch) ab, aber das macht nicht viel aus, weil es ja hier vor allem auf die Hand ankommt, an der allein nennenswerte Geschwindigkeiten auftreten. Und dass das Rütteln trotz des Kraftverhältnisses 3 : 1 für Ab- und Aufschlag noch gut geht, erklärt sich damit, dass der Abschlag jetzt, wo er bedeutend weniger Kraft fordert, einfach schneller, der anstrengende Aufschlag aber langsamer ausgeführt wird, was eine stärkere Aufrichtung der resultierenden Gesamtkraft zur günstigen Folge hat.

Höhen- und Seitensteuerung. — Dass der Vogel nicht wie ein Flugzeug durch Schwanzheben energiever-schenkend Höhensteuer zu geben pflegt, sollte jeder Kenner des Vogelflugs wissen¹⁾. Eine naheliegende und bekannte Möglichkeit, die keine Extraleistung erfordert und die wir am Modell leicht nachahmen können, besteht im

1) Eine Betrachtung nach dem Sparsamkeitsprinzip ist bei der Flugbewegung, wo es so entscheidend darauf ankommt, Energie zu sparen, immer eine hochempfindliche Sonde zum Vorfühlen der tatsächlich verwirklichten Verhältnisse.

nach-vorne-Nehmen der Flügel (Schwanzwärtsrücken des Schwerpunkts). Es gibt aber noch eine dritte, bisher unbeachtete Möglichkeit, die wir auch am Modell demonstrieren können: die Flügel schlagen weiter nach unten aus (oder schlagen wenigstens in ihrer unteren Weggälfte kräftiger)! Die Wirkung besteht darin, dass der Schub, der ja von den Flügeln geleistet wird, relativ zum Angriffspunkt der übrigen Luftkräfte am Flügel tiefer angreift, was den Vogel insgesamt aufrichtet, ebenso wie das bei einem Flugzeug Propeller tun würden, die weit unter der Tragfläche angebracht wären. Aus dem gleichen Grund (mit umgekehrtem Vorzeichen) dürfen wir auch beim Modell die Flügel nur wenig weiter nach oben als nach unten ausschlagen lassen, sonst gibt es ein bei stärkeren Flügelschlägen sehr peinliches (auch durch viel Schwanzheben nicht kompensierbares) Kippmoment nach unten!

Ich habe den Verdacht, dass diese bequeme Form der Höhensteuerung bei den Vögeln allgemein beliebt ist. Bei vielen auffliegenden Vögeln (zumal Sperlingen, Finken usw.) kann man übrigens deutlich erkennen, dass die Flügel tiefer herab- als heraufbewegt werden; sie fliegen also ganz offensichtlich in einem bezüglich der Längsachse labilen Gleichgewicht unter Zubilfenahme feinsten labyrinthärer Korrekturen.

Sehr viel problematischer ist die Seitensteuerung. Auch hier können wir am Modell sofort allerlei lernen: z. B. wie schief die verbreitete Meinung ist, der Vogel könne Kurven fliegen, indem er einfach auf einer Seite „stärker“ schlüge und damit hier mehr Vortrieb gewönne. Ich habe diese Ansicht sehr drastisch durch Bau eines Modells ad absurdum geführt, das nur mit einem Flügel schlagen konnte, während der andere starr am Rumpf sass: solange man den Rumpf festhielt, bewegte sich also nur ein Flügel mit einem bestimmten Schlagwinkel von 90° ; sobald man ihn losliess, schlugen aber beide Flügel, jeder mit dem Schlagwinkel von etwa 45° , während der Vogel geradeaus davonflog. Auch wenn die Trägheit des Rumpfes durch Befestigung einer zusätzlichen Masse stark erhöht wurde, liessen sich keine merklichen Unterschiede der Schlagamplitude beider Seiten feststellen. Dieser Modellversuch gilt für alle langsamschlagenden Formen: die Trägheit der Körpermasse gegen ein Drehmoment um die Rumpflängsachse ist viel zu gering, als dass es dem Vogel möglich wäre, durch einseitige, stärkere Muskelbetätigung (bei sonst gleicher Flügelstellung auf beiden Seiten) tatsächlich eine einseitig vergrösserte Schlagamplitude beim Fliegen zu erzielen; stattdessen erreicht er nur eine unliebsame Hin- und Herdrehung seines Körpers um die Längsachse. Allein bei kleinen Vögeln mit hohen Schlagfrequenzen, wo die

auftretenden Momente viel schneller ihre Richtung wechseln, kommt die geforderte Funktion der Massenträgheit und damit ein Steuern durch blosses, einseitiges, ausholenderes Schlagen praktisch in Frage, obschon es mir in Anbetracht anderer viel wirksamerer Mittel auch hier nicht sehr wahrscheinlich erscheint.

Dagegen gibt es ein anderes sehr einfaches und sicher allgemein geübtes Mittel der Seitensteuerung: unterschiedliches Maß der Dreh-schwingung auf beiden Seiten! Sobald das eine Flügelende sich stärker verwindet — z. B. durch grössere Nachgiebigkeit der äusseren Flügelzone infolge geringerer Anspannung des Handgelenks (= Federstahls), — erleidet dieses eine geringere Vertikalkraft nach oben und unten beim Schlagen (das Schlagen wird leichter); der Erfolg ist, dass automatisch die Schlagamplitude hier grösser, auf der Gegenseite aber entsprechend kleiner wird, wodurch der Vortrieb hier zu-, drüben abnimmt. Der Vogel beschreibt einen Bogen, wird dabei von aussen stärker angeströmt und stellt sich nun von selbst schief in die Kurve (was ein „Abschmieren“ nach aussen verhindert und die Kurve u. U. noch enger macht). Also wohl verschiedene Schlagamplitude rechts und links, aber nicht durch verschieden starkes Schlagen!

Unrichtig ist auch die Meinung, der Vogel könne durch einseitiges Verkleinern der Fläche Seitensteuer geben, indem hierdurch zunächst eine Schräglage und damit eine Kurve nach der tieferen Seite entstünde. Das gilt nur für den Gleitflug; denn beim Schwingenflug würde der verkürzte Flügel sogleich mit vergrösserter Amplitude schlagen, damit an einem zwar kürzeren Hebelarm einen andererseits vergrösserten Vortrieb liefern und den beabsichtigten Effekt (je nach den übrigen Bedingungen, z. B. Elastizitätsverhältnissen) stören, aufheben oder in sein Gegenteil verkehren; der Vogel aber würde zugleich seitlich abstürzen. Wenn ein Vogel sich (in ununterbrochenem Flügelschlagen) auf die Seite legen will, so macht er das übrigens am einfachsten so, dass bei beiderseits gleichbleibender Fläche nur der mittlere Winkel, um den beide Flügelenden schwingen, auf der Seite, die sich heben soll, etwas steiler gemacht wird, so dass hier beim Aufschlag ein kleinerer Flügelabschnitt von oben angeströmt und beim Abschlag die tragende Vertikalkraft durch Anströmung in grösserem Anstellwinkel erhöht wird. Die Wirkung ist, wie auch das Modell einen lehren kann, eine prompte Drehung um die Rumpflängsachse. Doch nun kommt ein entscheidender Punkt: ist dabei die Fluglage um die Längsachse labil oder nahezu labil, wie es bei Vögeln in diesem Manöver immer der Fall sein wird, dann geht der Flug gerade-

aus weiter und bei dazukommendem Höhensteuergeben (Schwerpunktverlagerung nach hinten) in eine Kurve nach der herabgeneigten Seite über. Ist dies aber nicht der Fall (d. h. liegt der Schwerpunkt tief) dann widersetzt sich der Vogel „stehaufmännchenartig“ dieser Neigung, wobei jetzt der zu steil hochgedrehte Flügel, der aber nicht nach oben kann, an dem folglich die Strömung mehr oder minder abreisst, mehr Rücktrieb (Widerstand) erleidet als der andere, wodurch eine Kurve in der entgegengesetzten Richtung mit Tendenz zum Abstürzen nach aussen eingeleitet wird. Wir sehen also, dass die für Flugmodelle mit genügend tief liegendem Schwerpunkt richtige Vorstellung, der Vogel würde durch steiler-Anstellen des z. B. linken Flügels und damit Bremsen auf der linken Seite in die Linkskurve gehen, wobei die innen vermehrte Tragkraft, also das schädliche Drehmoment um die Längsachse nach rechts einfach in Kauf genommen werden könnte, für Vögel ganz gewiss falsch ist. Ganz abgesehen davon, dass auch hier wieder das Mittel viel zu unrentabel wäre, also dem Vogel (selbst wenn er mal, wie eine Weihe im Segelflug, die Flügel schön hoch hielte) bestimmt „wider den Strich“ ginge. Das hat auch LORENZ schon erkannt und mit anderen Worten ausgedrückt, aber man ist ihm darin nicht gefolgt.

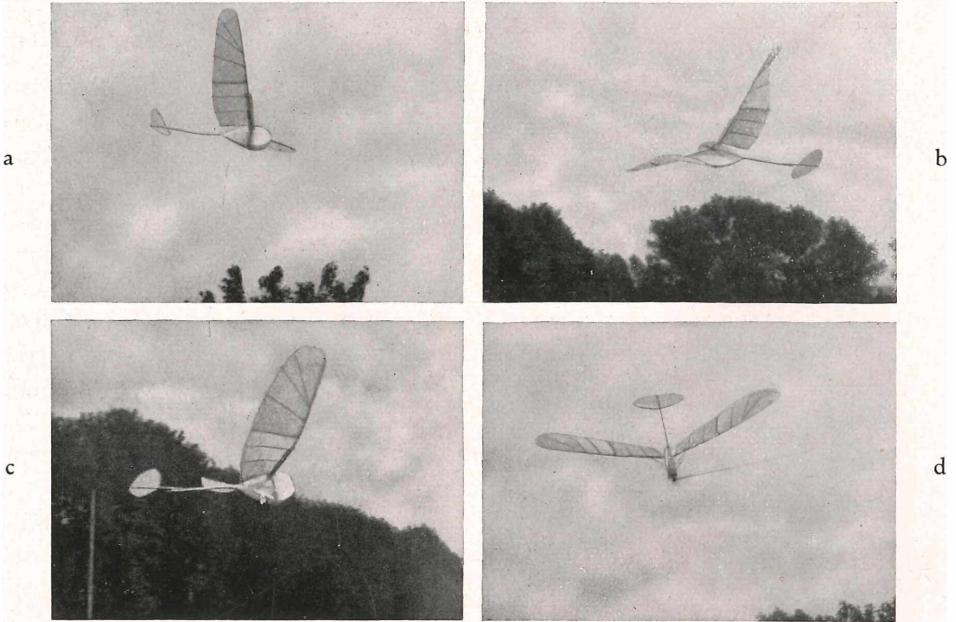
Ganz sicher hat schliesslich LORENZ auch darin recht, dass bei scharfen Kurven der Vogel sich immer einfach „auf die Seite wirft und Höhensteuer gibt“, ein Manöver, dessen tadellose Ausführung auch der Anspruchsvolle vom künstlichen Vogel nicht wird verlangen können, ob schon es gelegentlich von ihm „spontan“ ausgeführt wird (Taf. XVII, 2). Dazu müssen wir vor allem den wichtigen Punkt im Auge behalten, dass bei all solchen Bewegungen die Fluglage vorübergehend fast oder völlig labil ist — wie überhaupt Labilität im Wasser wie in der Luft eine Voraussetzung für Wendigkeit bedeutet ¹⁾. Bei labiler Ausgangsstellung genügen aber kleinste rechts-links-Unterschiede im soeben besprochenen Sinne, um ein sich schnell steigerndes seitliches Kippen einzuleiten. Wer also in Momentaufnahmen solcher Vögel (in steiler Seitenlage z. B.) asymmetrische Flügelstellungen entdeckt und in diesen nun die eigentlichen, diese Lage verursachenden Steuerbewegungen

1) Dass z. B. die Mehrzahl der geschickten, wendiger Knochenfische labil im Wasser liegen, geht nicht etwa aus der Rückenlage nach dem Tode (die wegen der Tonusänderung wenig beweist), sondern aus der Fähigkeit hervor, bei der Lichtrückenreaktion mit gleicher Leichtigkeit schräg, auf der Seite und mit dem Rücken nach unten zu schwimmen (s. v. HOLST, Die Gleichgewichtssinne der Fische; Verh. Deutsch. Zool. Ges. 1935).

sieht, begeht einen ziemlich sicheren Fehler; denn was er sieht, sind meist im Gegenteil die viel gröberen und anhaltenderen Kompensationsbewegungen, die verhindern, dass die eingeleitete Abweichung aus der Ausgangsstellung zu weit geht, und die diese letztere schliesslich wieder herstellen. Eine Kompensationsbewegung (wenn auch eine selbsttätige, durch Elastizität bedingte) zeigt vom künstlichen Vogel auch Taf. XVII, 2b; die deutlich stärkere Aufdrehung des linken Flügelendes beim ungefähr 80° seitlich geneigten Vogel ist nicht etwa (im Sinne der oben kritisierten Meinung) Ursache der Linkskurve (und mithin Ursache dieser Schiefelage), sondern im Gegenteil mit ein Grund dafür, dass das Modell sich gleich wieder aufrichtete und geradeaus weiterflog, während die Schräglage selber durch Windstoss gegen den rechten Flügel zustande gekommen war.

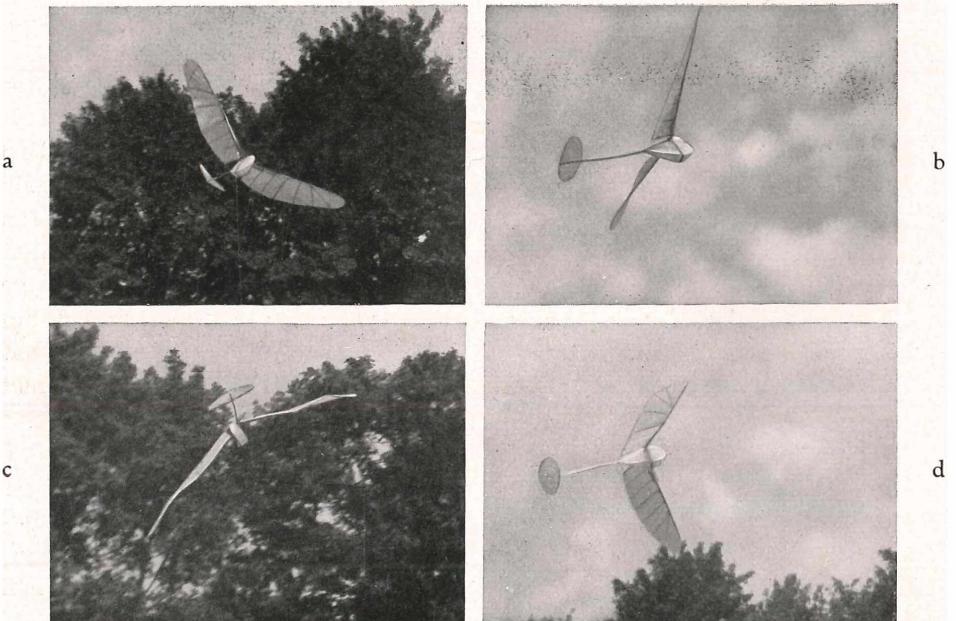
Mit dieser kurzen Schilderung, die nicht viel mehr als eine Anregung sein kann, aus der man ersieht, wieviel wir von so einem künstlichen Vogel lernen können und wie viel es hier noch neu zu lernen und umzulernen gibt, sei dieser Aufsatz beschlossen. Dass man durch kleine bauliche Abänderungen am Modell viele weitere Fragen beantworten kann, wird jeder leicht bemerken. So kann man durch entsprechende Anfügungen oder Einschnitte an der Wickelplatte ein beliebiges Kraftverhältnis von Ab- und Aufschlag, durch Aendern der Winkel der Kurbel andere Drehschwingungsamplituden, durch Aenderung des Abstandes des Führungsbleches vom Schultergelenk andere Schlagamplituden erzielen u. a. m.

Diese Einzelfragen, ebenso wie die nach der Wirkung anderer Flügelformen (s. z. B. Abb. 10a) und Flächenbelastungen überschreiten jedoch den Rahmen des vorliegenden Aufsatzes. Hoffentlich wird letzterer — gerade dadurch, dass viele, nun leicht zu beantwortende Fragen offenbleiben — seinen eigentlichen Sinn erfüllen, indem nun nicht nur eifrige Federn über geduldiges Papier huschen und alles hier Gesagte wieder schwarz auf weiss „widerlegen“, womit der Berg von über den Tierflug geschriebenem Unsinn noch etwas grösser gemacht wäre, sondern indem jedermann, der eine eigene Meinung hat oder gewinnen will, mit Geduld selber einen oder besser viele „Vögel“ baut und alles selbst aus eigener Anschauung durch „Versuch und Irrtum“ erlernt. Nur so bekommen wir das Fliegen der Vögel aus dem „Verstande“, der, sich selbst überlassen, oft krumme Wege geht, wirklich „ins Gefühl“ zurück (wo es m. E. hingehört), und nur so werden wir in Zukunft Theorien vermeiden, die einem Vogel, könnte er sie lesen, nur Leibweh, und wollte er sie sogar befolgen,



1.

4 Momentaufnahmen des fliegenden „Vogels“; a oberer Umkehrpunkt, der Flügel ist nicht verwunden; b Beginn eines kräftigen Abschlages im Steigflug, starke Verwindung der „Hand“; c und d Mitte des Flügelabschlages im Horizontalflug; gleichmäßig zum Flügelende zunehmende Verwindung.



2.

4 weitere Aufnahmen des fliegenden „Vogels“; a und b Flügelauflschlag, starke Verdrehung des ganzen Flügels nach oben und geringe Verwindung (b); c u. d unterer Umkehrpunkt, von hinten (c) und von seitlichen (d), gesehen keine Verwindung des Flügels. Der Vogel befindet sich überall in einer Linkskurve.

1

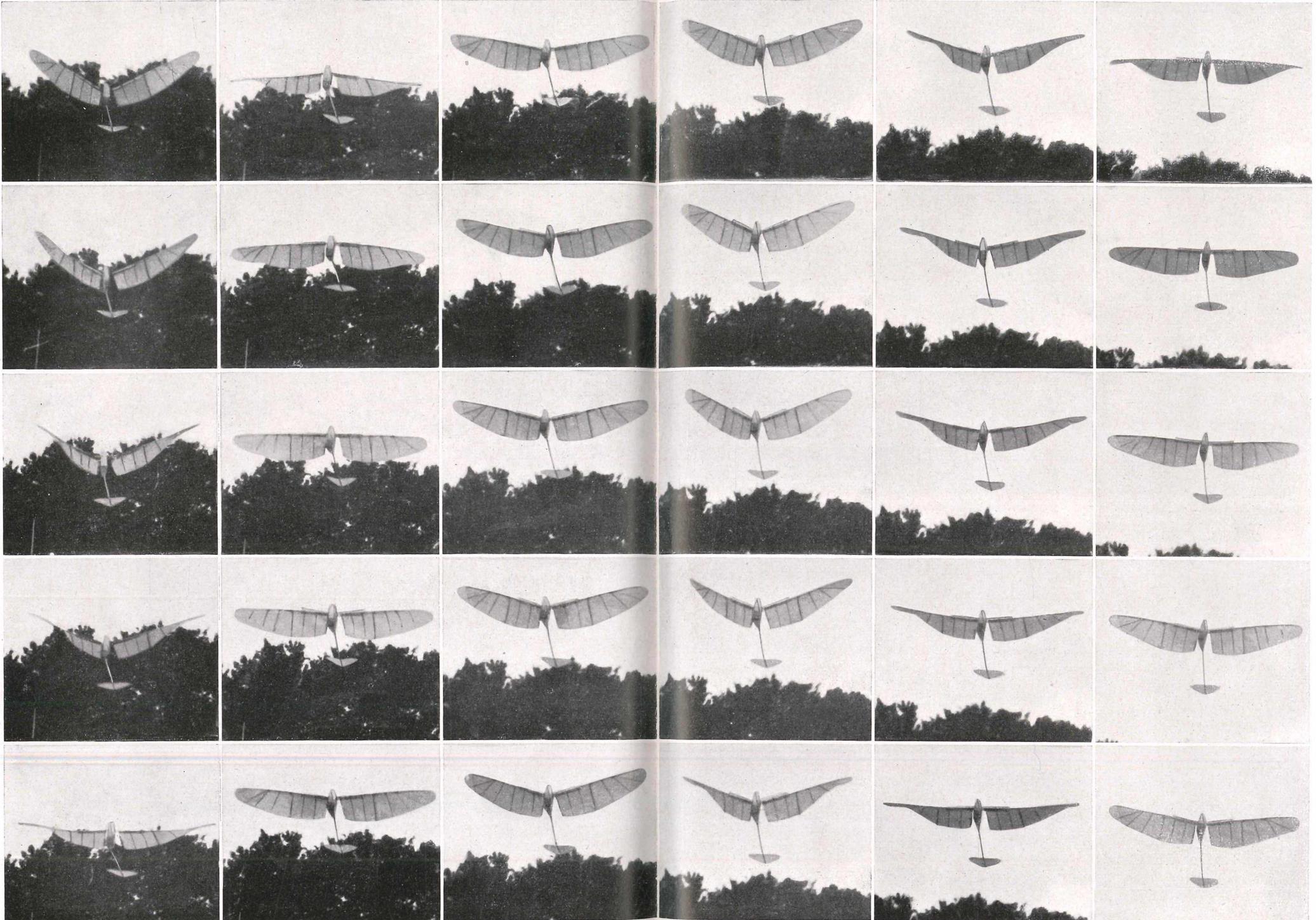
2

3

4

5

6



Filmbilder aus einem Steigflug (etwa 30° Anstieg), bei Ansicht von vorne; Bildfolge von oben nach unten. Deutlich ist die Anstellwinkelschwingung und beim Abschlag die zusätzliche Verwindung erkennbar. Man bemerkt ferner, im Vergleich mit dem Hintergrund, daß der Vogel bei Ab- und Aufschlag fast gleichmäßig an Höhe gewinnt (Schlagfrequenz etwa 2,5 pro sec.)

1

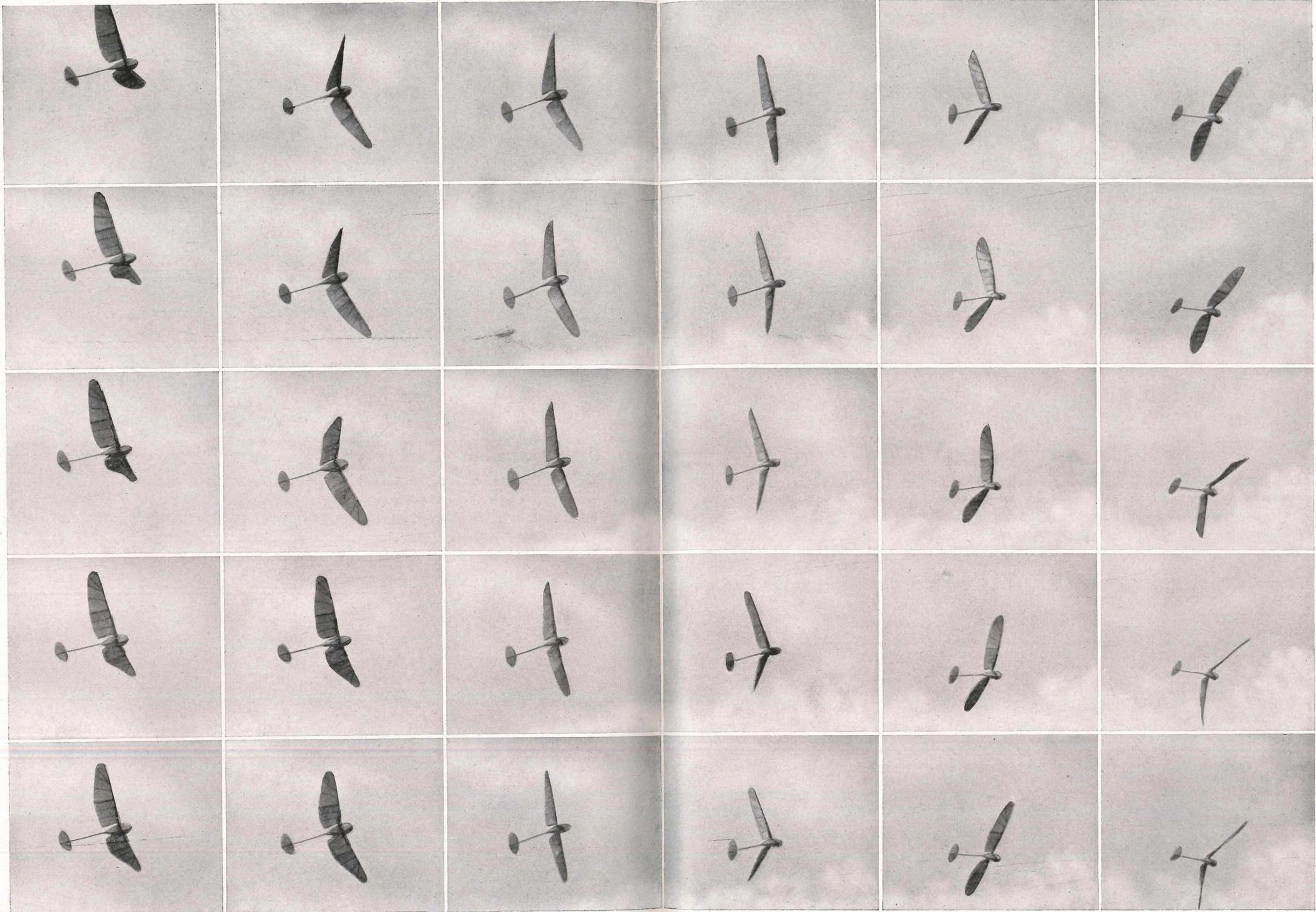
2

3

4

5

6



Filmbilder aus einer horizontalen Flugstrecke mit scharfer Linkskurve; der Vogel legt sich vorübergehend (Reihe 3 und 4) fast um 90° auf die Seite und fängt sich anschließend wieder auf. Die Blickrichtung ist von seitlich-unten, zum Schluß (Reihe 6) von hinten-unten.

den sicheren Tod durch Absturz verursachen müssten. Da ist es vielleicht doch besser, erst zum Handwerkszeug zu greifen und seinen eignen „Vogel“ solange in praxi zu Tode zu stürzen, bis man vor lauter Aerger über die dauernden Knochenbrüche sich schliesslich zur Aufgabe seiner Theorie bequemt — und eine aufbaut, die den Dingen besser gerecht wird. So etwa ist es mir viele Jahre lang ergangen, und ich kann versichern, dass ich das Vergnügen, das mir heute ein sicher und elegant weit über das Feld fliegender grosser künstlicher Vogel verursacht, vor dem die Kleinvögel fliehen, die Feldmäuse in ihre Löcher huschen und mit dem die Krähen manchmal etwas schüchtern anbändeln, gegen kein anderes eintauschen möchte.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Journal für Ornithologie](#)

Jahr/Year: 1943

Band/Volume: [91_1943](#)

Autor(en)/Author(s): Holst Erich von

Artikel/Article: [Ueber "künstliche Vögel" als Mittel zum Studium des Vogelflugs 406-447](#)