P 1200
(29, 1941

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

UNTER MITWIRKUNG
VON

A. BUTENANDT, BERLIN-DAHLEM
P. DEBYE, BERLIN-DAHLEM
F. K. DRESCHER-KADEN, GÖTTINGEN
H. v. FICKER, WIEN
R. GRAMMEL, STUTTGART
O. HAHN, BERLIN-DAHLEM
M. HARTMANN, BERLIN-DAHLEM
F. KÖGL, UTRECHT
A. KÜHN, BERLIN-DAHLEM
M. v. LAUE, BERLIN
E. v. d. PAHLEN, POTSDAM
F. SAUERBRUCH, BERLIN
H. STILLE, BERLIN
F. v. WETTSTEIN, BERLIN-DAHLEM

HERAUSGEGEBEN
VON

FRITZ SÜFFERT

ORGAN DER GESELLSCHAFT DEUTSCHER NATURFORSCHER UND ÄRZTE
UND
ORGAN DER KAISER WILHELM-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTEN

NEUNUNDZWANZIGSTER JAHRGANG 1941

Stadtbibliothek Nürnberg

BERLIN
SPRINGER-VERLAG
1941

Biologische und aerodynamische Probleme des Tierfluges.

Von Erich v. Holst und Dietrich Küchemann, Göttingen.

I.

Unter den Grenzgebieten der Biologie, die sich mit menschlicher Technik berühren, gebührt dem Tierflug eine Sonderstellung sowohl in Anbetracht seiner Bedeutung als auch seiner theoretischen und praktisch-experimentellen Schwierigkeiten. Die Einstellung des Biologen und des Technikers zu dem Gebiet ist naturgemäß verschieden: Beschäftigt den Biologen der historische Werdegang der fliegenden Tierwelt, die Aufklärung der mannigfachen Anpassungen in Bau und Funktion, die natürlich nicht allein den Flügel und seine Bewegungsweise, sondern auch Muskulatur, Nervensystem und Sinnesorgane, Kreislauf und Atmung, genau genommen den ganzen Organismus betreffen —, denn das Fliegen ist eine Hochleistung, die ein Optimum von technischer Durchkonstruktion, Beschaffenheit des Baumaterials und Betriebsökomomie erfordert —, so interessiert den Physiker

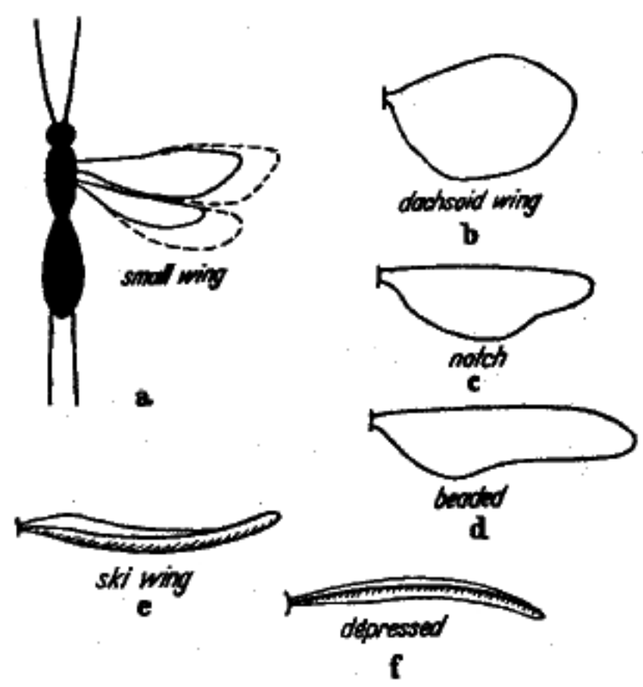

Fig. 1. Einige Beispiele weitgehender Flügeländerungen durch Mutationen bei Insekten: *a*) Schlupfwespe Habrobracon, Verringerung der Fläche auf etwa die Hälfte (der normale Flügelumriß ist gestrichelt angegeben); die Mutante ist flugfähig; *b—d*) Änderungen der Flügelform; *e, f*) (Ansicht von vorne) Änderung der Flügelwölbung bei der Taufliege Drosophila.

der Bewegungsvorgang selbst und die Aufklärung seiner aerodynamischen, allenfalls noch seiner energetischen Seite

Das Aufgabengebiet des Biologen, soweit es anatomische Fragen betrifft, ist erst in großen Umrissen gelöst; im einzelnen bleibt noch viel zu tun. Der Physiologe hat hier völliges Brachland vor sich, dessen Bearbeitung erst an wenigen Stellen begonnen wurde. Wer sich mit anatomisch-physiologischen Fragen an Flugtieren befaßt, muß aber bald bemerken, daß er ohne genauere Kenntnis der physikalischen Seite nicht weiterkommt, daß seine Schlußfolgerungen unsicher oder unmöglich gemacht werden, weil ja so vieles im Organismus hinzielt auf die Bewältigung dieser rein technischen Aufgabe. Aus dieser Not gilt es einen Vorteil zu machen; denn nicht oft bietet sich in der belebten Natur die Möglichkeit, einen Vorgang oder Funktionskomplex einem rein technischen und somit eindeutig erfaßbaren Urteil zu unterstellen. So bekommt, um nur dieses eine herauszugreifen, der soviel umstrittene, oft verpönte und doch unvermeidliche Gesichtspunkt der „Zweckmäßigkeit" einer tierischen Bildung dort sogleich ein bestimmteres Aussehen, wo die biologische Zweckmäßigkeit zu einer technischen wird. Um ein für die heutige Genetik aktuelles Beispiel zu geben, können wir — Kenntnis der aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten vorausgesetzt — bei Mutationsschritten, die den Flügel, seine Größe, Form, Elastizität, Beborstung usw. betreffen und deren bei Insekten eine Fülle bekannt sind (s. Fig. 1), sogleich sagen, unter welchen Außenbedingungen (Flugbedingungen) der Träger der neuen Anlage ceteris paribus anders („besser" bzw. „schlechter") dastehen wird als die Ausgangsform; eine Aussage, die für die Beurteilung der Bedeutung dieser Abänderung für ihren Träger entscheidend wichtig ist.

Der technische Gesichtspunkt bekommt für den Biologen bei der vergleichenden Untersuchung der Mannigfaltigkeit tierischer Flugorgane in zwei Zusammenhängen besonderes Interesse: Erstens dort, wo er mit dem historischen in Konkurrenz tritt, indem Ausgangsmaterial und Entwicklungsmöglichkeiten der Anpassung an ersichtlich „angestrebte" technische Ziele Grenzen setzen — und hier bleibt immer erstaunlich, wie weit diese Grenzen von der Natur hinausgeschoben werden, wie wenig der stammesgeschichtlich bedingte „Ballast" einen Hemmschuh technischer Vervollkommnung darstellt. Viele Beispiele werden wir kennenlernen. — Zum zweiten sind alle jene Fälle von Interesse, wo der Flügel gleichzeitig Objekt einer Anpassung an andere, nicht flugtechnische Aufgaben ist, wo er weiteren Lebensäußerungen dienen oder sie wenigstens nicht behindern soll.

Die Aufgabe des mechanischen Schutzes z. B. spielt bekanntlich bei Insekten eine große Rolle, wo entweder eine enge gegenseitige Korrelation von Körper- und Flügelform (z. B. bei manchen Wanzen) oder eine einseitigere Anpassung eines Flügelpaares, das damit als Flugorgan mehr oder weniger ausscheidet, an die Schutzfunktion die Folge ist (z. B. bei vielen Käfern). Neben den mechanischen tritt häufig der optische Schutz, wobei auf vielfältigen Entwicklungswegen auch die Flügel mit ergriffen werden können. Die dabei auftretenden Formänderungen beeinflussen notwendig das Flugvermögen und zwingen vielfach zu seiner Aufgabe — ein Verzicht, der in all den Fällen verständlich wird, wo der Flug nicht der Nahrungssuche oder der Fortpflan-

zung, sondern vor allem der Flucht dient, also im Falle einer Tarnung durch ein unvergleichlich sparsameres Mittel ersetzt und damit überflüssig wird. Fig. 2 gibt für das Gesagte einige Stichproben aus der Gruppe der Heuschrecken. Das vergleichende Studium solcher Übergangsformen mit rückschreitender Flugfähigkeit wird besonders reizvoll dadurch, daß hier, wie auch sonst so oft, die Funktion der Form vorauseilt, d. h. Formen physiologisch fluguntüchtig sind, für die ein Fliegen, technisch-anatomisch gesehen, durchaus noch in Frage käme, und weiterhin dadurch, daß rudimentäre Flugorgane immerhin noch andere Verwendung (z. B. als „Schreckmittel" durch plötzliches Ausbreiten) finden können. Für die vergleichende biologisch-physiologisch-aerodynamische Untersuchung bietet sich hier ein weites Feld.

Bei all den angedeuteten Problemen kann der Biologe nicht ohne eine experimentell und theoretisch begründete Vorstellung dessen auskommen, was beim Fliegen physikalisch geschieht, und darüber hinaus kann ihn der Aerodynamiker lehren, auf bestimmte Zusammenhänge zu achten, Daten so zu sammeln, daß sie auch physikalisch verwertbar sind. In dieser Hinsicht fehlt es noch allenthalben; der vorliegende Aufsatz will auch dazu einige Fingerzeige geben.

Auf der anderen Seite ist der am Tierflug interessierte Physiker auf die Hilfe des Zoologen gleichfalls angewiesen; denn, abgesehen von rein praktischen Gesichtspunkten, kann auch jede einseitig physikalische Betrachtungsweise leicht zu Fehlschlüssen führen, deren die Geschichte dieses Problems eine ganze Reihe kennt, da ja beim Organismus, wie schon angedeutet, im Gegensatz zur Flugmaschine die verschiedenen, außer dem Fliegen noch zu bewältigenden Lebensfunktionen in ihrer stammesgeschichtlich bedingten Form mit der Flugleistung selbst in ein Gleichgewicht gebracht sind.

Wir können hier die Frage aufwerfen, welchen Nutzen überhaupt die Luftfahrttechnik aus der Beschäftigung mit dem Tierflug heute noch gewinnen könnte. Die Zeit, da der Vogel allgemein das ideale Vorbild und die Nachahmung seines Fluges Ziel menschlicher Flugtechnik war, ist lange vorbei; man kann sagen, daß sie mit LILIENTHALS Todessturz im Jahre 1896 abschließt. Alle bisherigen, früheren und späteren Versuche, Schwingenflugzeuge zu bauen, schlugen fehl und lehrten nur die Schwierigkeiten besser kennen — was freilich nicht hindert, daß manche auch heute und wohl auch in Zukunft den Schwingenflug als die allein vorbildliche Flugart preisen und immer wieder Schwingenflugzeuge, allerdings auf dem Papier, „erfinden" werden. Die Zahl ernsthafter Verfechter des Schwingenfluggedankens unter den Konstrukteuren ist jedoch gegenwärtig gering[1]). Da aber der tierische Schwingenflug immer unter dem Gesichts-

[1]) An erster Stelle wäre hier A. LIPPISCH [Flugsport 17, 246 (1925); Luftwelt 2, 106 (1935); Der Segelflieger 1936, H. 9—12] zu nennen, der in verschiedenen Aufsätzen die Sachlage zu klären versucht und auch flugfähige Modelle gebaut hat, die außer einem starren Tragflügelpaar zwei kleine elastische Schwingen besitzen, welche die Luftschraube ersetzen, — eine Teillösung, die wesentlich einfacher zu verwirklichen ist als das „Vollschwingen"prinzip der Tiere.

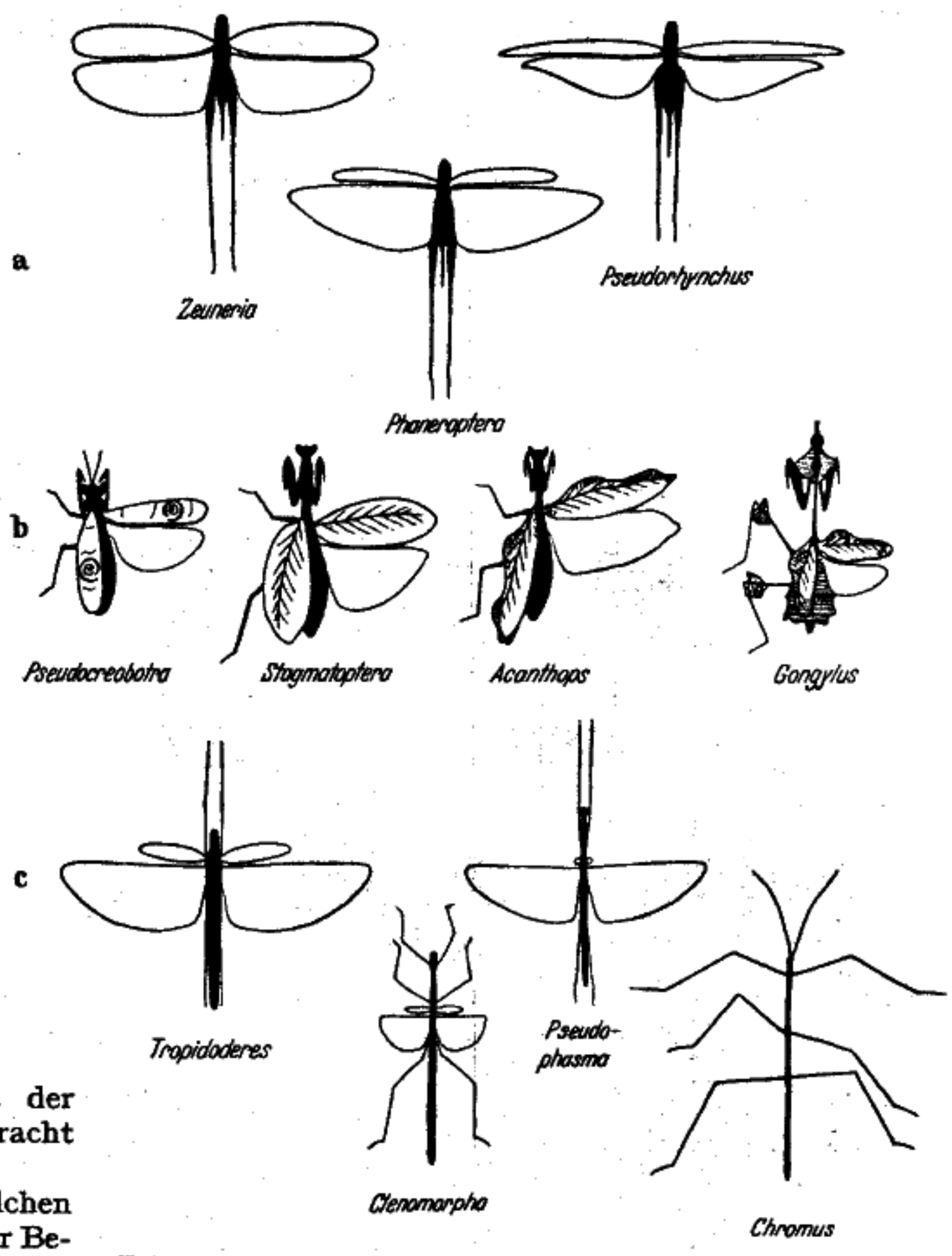

Fig. 2. Beispiele verschiedener Flügelumbildungswege bei Heuschrecken. Die Typen der Reihe *a* unterscheiden sich bei etwa gleicher Größe und Flächenbelastung hauptsächlich in der Flächenform und somit in erster Linie in flugtechnischer Hinsicht. In Reihe *b* und *c* wirkt die optische Anpassung mitbestimmend auf die Flügelbeschaffenheit ein; *b:* Anähnelung an Blattaussehen; die linke Form trägt (noch unter Wahrung des üblichen Flügelumrisses) die Zeichnung einer Blüte; bei der zweiten ahmt der vordere Flügel ein gelbes, frisch abgefallenes, bei der dritten ein braunes, schon angefaultes Blatt nach; die vierte stellt im ganzen ein Bündel stark zerstörter Blattreste dar, nur der in Ruhelage nicht sichtbare Hinterflügel bleibt (abgesehen von der Größenabnahme) unbeteiligt; *c:* zunehmende Anpassung an das Aussehen eines Zweiges unter Rückbildung der Flügel.

punkt einer etwaigen Nachahmung dieser Bewegungsform betrachtet wird — die Einführung des gewölbten, dicken, vorn abgerundeten Vogelprofils in die Flugtechnik durch Lilienthal ist die einzige heute praktisch wichtige dem tierischen Vorbild verdankte Neuerung — so hat das Interesse für Tierflug in der Technik begreiflicherweise erheblich nachgelassen. Nach unserer Auffassung haben die steten Diskussionen über menschliches Schwingenfliegen (womöglich noch mit Muskelkraft!) der Sache sogar mehr geschadet als genützt, weil sie die Aufmerksamkeit von anderen, auch für die heutige Flugtechnik noch bedeutsamen Dingen ablenkten, von Sonderaufgaben, die Flugtiere und Flugmaschinen trotz des verschiedenen Flug-

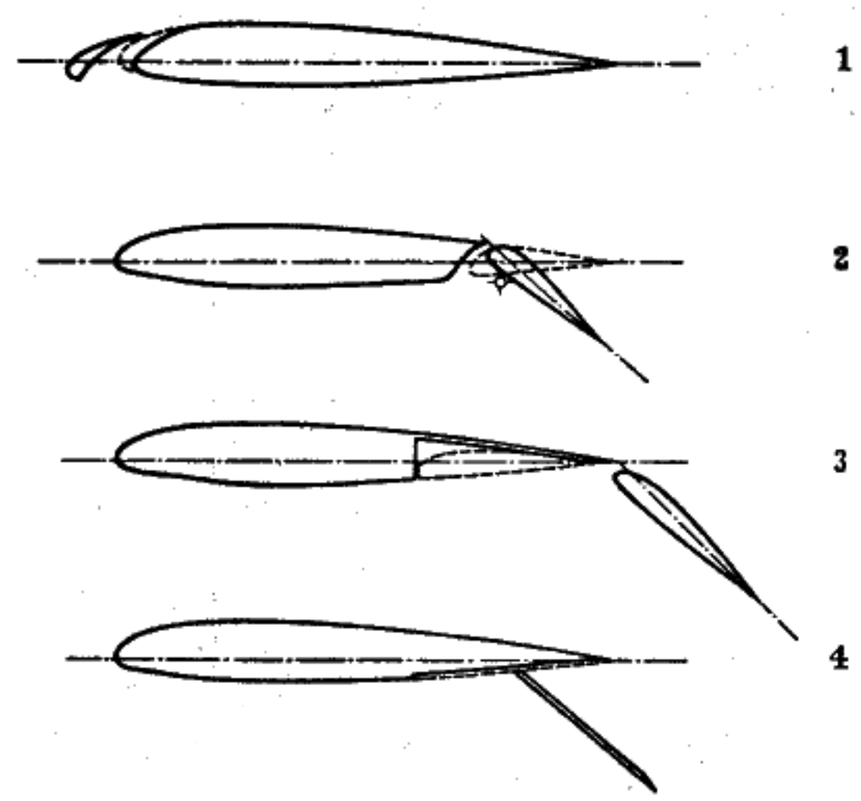

Fig. 3. Verschiedene Ausführungen von Landehilfen (Mitteln zur Hochauftriebserzeugung) bei Flugzeugen: 1. Vorflügel, 2. Spaltklappe, 3. Fowler-Flügel, 4. Spreizklappe (Zapklappe); gestrichelt: Stellung der Hilfsflächen bei Nichtgebrauch (im Schnellflug), ausgezogen: Stellung beim Langsamflug.

verfahrens in gleicher Weise lösen müssen und tatsächlich zum Teil, und zwar unabhängig voneinander, gelöst haben.

Was damit gemeint ist, sei an einem Beispiel erläutert: an der für die schnelleren, größeren Flugtiere (größere Vögel), ebenso wie für die schnellen Flugmaschinen bestehenden Aufgabe, ihre Geschwindigkeit durch besondere Hilfsmittel ohne entsprechenden Auftriebsverlust bei Bedarf herabzusetzen. Solcher „Hochauftriebsmittel" gibt es bei Flugzeugen eine ganze Reihe, von denen Fig. 3 die wichtigsten zeigt. Ihr gemeinsames Prinzip besteht darin, einen größeren Anstellwinkel oder eine stärkere Wölbung des Flügels und damit höheren Auftrieb zu ermöglichen, ohne daß dabei die Strömung an der Flügeloberseite unter energieverzehrender Wirbelbildung „abreißt". Die gefährdeten Zonen liegen vorne hinter der Flügelnase und am Flügelende, weil an diesen beiden Stellen die Geschwindigkeit längs der Oberfläche stark abnimmt; hier also wird sie künstlich erhöht, indem durch düsenartig wirkende Schlitze (auf Grund des zwischen Ober- und Unterseite bestehenden Druckunterschiedes) hindurchgetriebene Luft der Strömung an der Oberseite erneut kinetische Energie zuführt. Derartige, oft erst bei Bedarf gebildete Schlitze werden demnach vorne (Vorflügel) oder hinten (Spaltklappe, Fowlerflügel) angebracht. Der Effekt kann im Prinzip durch zahlreiche solche Spalte noch verstärkt werden,

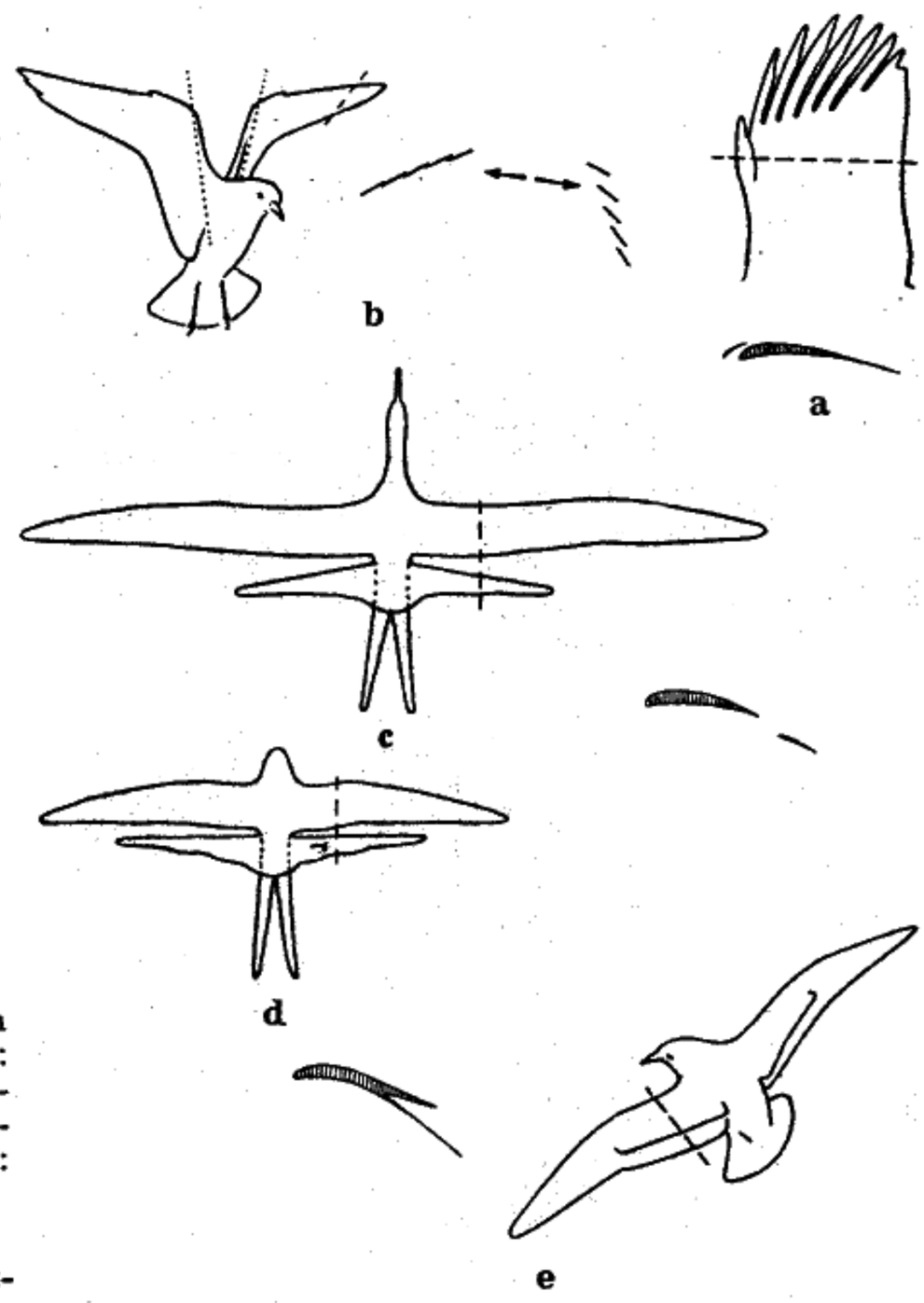

Fig. 4. Hochauftriebsmittel bei Vögeln: *a*) Flügel eines „Beschleunigungsrüttlers" (Fasan) mit Spalten zwischen den Handschwingen und abgespreiztem Daumenfittich; darunter Schnitt durch die Mitte der Flügellänge. *b*) Möve in Rüttelstellung; die Flügel schwingen etwa um die durch Punktlinien angedeuteten Drehachsen; daneben ein Schnitt durch die Flügelspitze bei Abschlag (= Vorschlag) und Aufschlag (= Rückschlag); der Pfeil deutet die Anströmrichtung an. *c*) Fregattvogel (Fregata) und *d*) Gabelschwanzfalke (Elanoides furcatus) mit geschlossenem und extrem gespreiztem Schwanz; daneben Schema eines Querschnitts. *e*) Möve, landend, und dabei Armschwingen und Deckgefieder als zwei Flächen voneinander abhebend; daneben schematischer Querschnitt. (*b* und *e* in Anlehnung an Momentaufnahmen.)

allerdings unter erheblicher Steigerung des Widerstandes. Eine analoge Aufgabe hat die einen Sog unter dem Flügelende und damit besseres Anliegen der Strömung über demselben bewirkende Spreizklappe.

Die genannten Hochauftriebsmittel sind auch bei vielen Vögeln verwirklicht. Bereits allgemein bekannt ist die Aufgabe des dem Vorflügel entsprechenden Daumenfittichs (Fig. 4a), dessen Abheben vom Flügel bei der Landung (und beim Start) durch Momentaufnahmen sichergestellt ist[1]). Das Verfahren, mehrere Spalte hintereinanderzuschalten, findet sich bei Vögeln in verschiedener Ausführung. So z. B. treten bei vielen Formen, die im Geradeausflug eine geschlossene Fläche haben, beim Rütteln auf der Stelle im Moment des Flügelaufschlages Spalte zwischen den Handschwingen auf (Fig. 4b). Bei den „Beschleunigungsrüttlern" (K. LORENZ) sind die Handschwingen am ausgebreiteten Flügel ständig durch Schlitze getrennt, so daß eine analoge Wirkung hier bei Auf- *und* Abschlag in Frage kommt. Auch viele größere Vögel, zumal Aufwindsegler, haben oft weite Spalte zwischen den Handschwingen (vgl. Fig. 5a). Auf die vermutlich in den einzelnen Fällen aerodynamisch unterschiedene Wirkung solcher Spaltflügel sei hier mangels exakterer Daten nicht näher eingegangen.

Das Herausfahren eines Flügelteiles nach hinten, wie beim Fowlerflügel, wobei Flächenvergrößerung, Wölbungssteigerung und Spaltwirkung auftriebserhöhend zusammenwirken, kommt bei den Vögeln aus anatomischen Gründen nicht in Frage; dafür nutzen manche offenbar die Möglichkeit aus, einen langen und tief gegabelten, gleichsam aus zwei nach hinten geschlagenen Flügeln bestehenden Schwanz an den Flügel heranzuspreizen. Eine Tendenz in dieser Entwicklungsrichtung findet sich bei vielen verschiedenen Vogelarten; Extremfälle sind der Fregattvogel (Fregata) und noch auffälliger ein amerikanischer Falke (Elanoides furcatus), bei dem die längste Schwanzfeder mit der längsten der sehr langen Handschwingen an Festigkeit, Profilwölbung und Länge weitgehend übereinstimmt (s. Fig. 4c, d). Die hier angegebene Wirkungsweise des Gabelschwanzes wurde von uns zunächst theoretisch erschlossen, dann bei Schwalben und Seglern beobachtet; später fanden wir bei A. MAGNAN[2]) eine vom Autor mit einer gewissen Verwunderung und ohne Versuch einer Deutung beschriebene Flugart des Fregattvogels, die genau auf unsere Annahme paßt[1]).

Vom Bestehen einer der Spreizklappe analogen Vorrichtung bei Vögeln haben uns Beobachtung und Momentaufnahmen landender Möven überzeugt. Hier werden bisweilen die Armschwingen so weit herabgewinkelt, daß sie sich vom Deckgefieder trennen und zwischen beiden eine keilförmige Öffnung entsteht, wie Fig. 4e erläutert.

Die am Beispiel der Hochauftriebsmittel aufgezeigten Parallelen zwischen Vogel und Flugzeug legen die Annahme nahe, daß sich bei näherem Studium des Tierfluges auch für die Technik neue und wichtige Formen der Ausnutzung von Luftkräften würden finden lassen; eigene Erfahrungen, auf die wir hier nicht näher eingehen dürfen, bestätigen diese Vermutung aufs beste.

II.

Auch bei einer Betrachtung von der theoretisch-aerodynamischen Seite her bietet der Tierflug eine Fülle interessanter Probleme. Die so erstaunlich weite Spanne der absoluten Größen der Flugtiere — von 9 m Spannweite beim ausgestorbenen Flugsaurier Pteranodon bis 2 mm und darunter bei Insekten — und die nicht weniger weite Spanne der Fluggeschwindigkeiten — von gegen 200 km pro Stunde Maximalgeschwindigkeit beim Wanderfalken (Falco peregrinus) und über 100 km/Std. bei einer Anzahl weiterer Vögel bis zur Maximalgeschwindigkeit von 4—5 km/Std. und darunter bei gewissen Insekten — legt eine Abschätzung des Bereichs der REYNOLDSschen Zahlen nahe, die für die Flugtiere in Frage kommen. Die REYNOLDSsche Zahl $Re = \varrho v l/\mu$, wobei v die Geschwindigkeit, l eine charakteristische Länge (Flügeltiefe), ϱ die Dichte des Mediums und μ dessen Zähigkeit bedeutet (μ/ϱ beträgt für Luft bei Zimmertemperatur etwa $15 \cdot 10^{-6}$ m²/sec), bezeichnet das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Zähigkeitskräften. Ihre Bedeutung liegt darin, daß die Bewegungsgesetze von Strömungen je nach dem Überwiegen der Trägheitskräfte (große Re) oder der Zähigkeitskräfte (kleine Re) wesentlich verschieden sind. Die REYNOLDSsche Zahl liegt bei vielen Vögeln im Horizontalflug erheblich über 100000 (Bussard etwa 250000, Taube und Fregattvogel etwa 300000, Wanderfalke bis zu 550000). Diese Zahlen liegen nicht allzu weit unter denen unserer Flugzeugtypen (einige 1000000); damit hängt zusammen, daß auch die Flügel der Vögel in Form, Profil und Oberflächenbeschaffenheit den Flugzeugtragflächen durchaus vergleichbar sind (vgl. Fig. 5a).

Gänzlich anders liegen die Verhältnisse jedoch bei der Mehrzahl der Insekten. Eine gewisse Schwierigkeit bietet hier die hohe Schlagfrequenz, weil dadurch die einzelnen Stellen der Flügelspann-

[1]) Vgl. E. STRESEMANN, Aves (in Handbuch d. Zool.) 1931, 572; schöne Bilder, vor allem vom Storch, finden sich auch bei K. LORENZ [J. f. Ornithol. 81, 107 (1933)]. Nach seiner Schilderung zu schließen, kann auch die erste Handschwinge diese Funktion übernehmen (Alpendohle). Auf die inhaltsreiche und auf unvoreingenommenen Beobachtungen beruhende Arbeit von LORENZ sei besonders hingewiesen. Sie ist wohl das beste, was seit LILIENTHAL zum Problem des Tierfluges geschrieben wurde, obgleich manche der darin vorgetragenen Deutungen sich nicht werden aufrechterhalten lassen.

[2]) Nach A. MAGNAN (Le vol des oiseaux et le vol des avions, Paris 1931, S. 133) hat dieser Vogel die Fähigkeit, plötzlich ohne sichtbaren Flügelschlag anzusteigen, wobei nur der Schwanz extrem gespreizt wird („trés étalée et grandement échancrée").

[1]) Selbstverständlich haben viele, so z. B. alle weichen und locker gebauten, Gabelschwänze der Vögel nicht aerodynamische, sondern andere biologische Aufgaben.

weite mit sehr verschiedener Geschwindigkeit angeströmt werden. Als Mittelwerte REYNOLDSscher Zahlen kann man abschätzend angeben: Kohlweißling 500, Hummel 4000, Libelle 6000. Bei diesen kleinen REYNOLDSschen Zahlen ist es nun sehr fraglich, ob sich überhaupt eine Zirkulation um den Flügel, wie sie die Tragflügeltheorie vor-

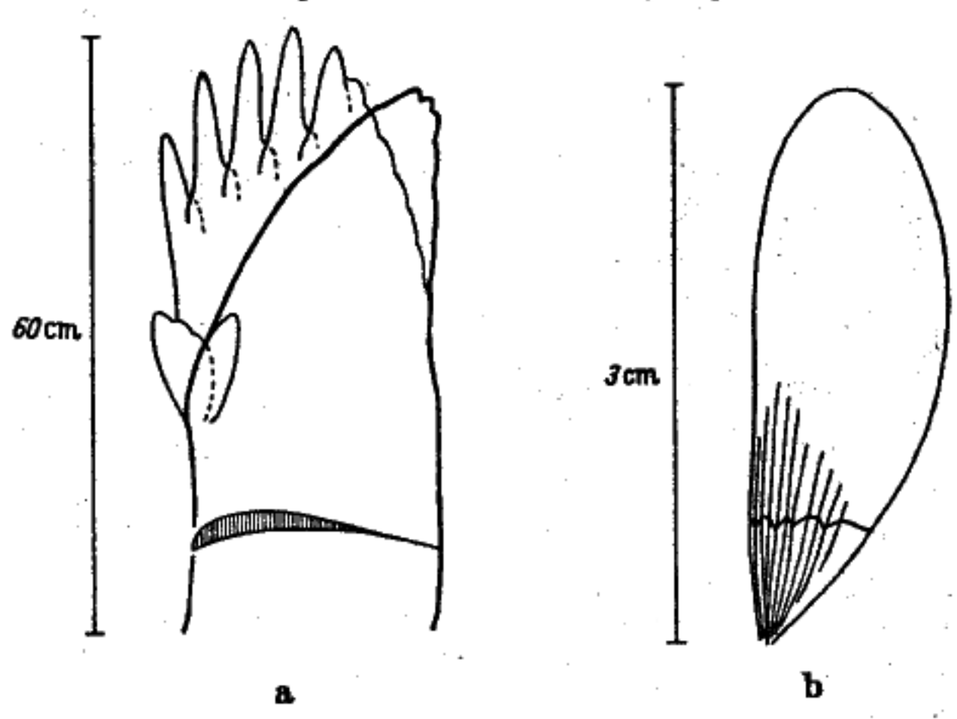

Fig. 5. *a*) Flügelumriß bei gebeugter und gestreckter Hand und Profil eines frischen Bussardflügels; *b*) Umriß und „Profil" eines Libellenflügels (Calopteryx).

aussetzt, ausbildet. Es ist bekannt, daß bei den REYNOLDSschen Zahlen der in der Flugtechnik üblichen Größenordnung diese ideale Strömung deshalb als Näherung für die wirkliche Strömung verwendbar wird, weil durch die turbulenten Reibungsschichten[1]) die Strömung praktisch bis zum hinteren Ende des Flügels anliegt. Bei niederen REYNOLDSschen Zahlen wird die Strömung jedoch vorzugsweise laminar sein. Bei laminaren Reibungsschichten bilden sich leicht infolge des Energieverlustes durch innere Reibung Rückströmungen aus, was eine Ablösung der Strömung vom Flügel und damit Auftriebminderung bedeutet. Diese Erscheinung kann aber durch Anbringung irgendeiner Vorrichtung, die Turbulenz in der Reibungsschicht erzeugt (z. B. eines dünnen Drahtes vor oder über der Flügelvorderkante), hintangehalten werden, weil der dadurch bedingte Teilchenaustausch quer zur Stromrichtung den wandnahen Schichten Bewegungsenergie zuführt, wodurch einer Rückströmung entgegengewirkt wird. Unter diesem Gesichtspunkt könnte man auch bei Insekten Vorrichtungen vermuten, die eine möglicherweise laminare Strömung künstlich turbulent machen. In der Tat findet man bei mikroskopischer Betrachtung an vielen Insektenflügeln, und zwar besonders an der Vorderkante, Borsten, Zähne oder ähnliche Gebilde, die durchaus diesem Zweck dienen können (vgl. Fig. 6). Die besonders häufige Beborstung ist in solchen Fällen nicht überraschend, wo sie sich über den ganzen Körper erstreckt und somit wohl eine Schutzfunktion, auch für den Flügel, haben könnte; in anderen Fällen aber (z. B. bei Oligarces) sind die Borsten auf den Flügelrand beschränkt, und zwar nur soweit, als derselbe als Tragfläche wirksam ist; hier dürfte eine andere als die vermutete aerodynamische Funktion der Borsten schwerlich in Frage kommen. Auch die Tatsache, daß der Insektenflügel eine dünne, oft aus Festigkeitsgründen an der Basis mehrfach geknickte Platte ist (Fig. 5b), ist bei kleinen REYNOLDSschen Zahlen nicht unbedingt von ungünstigem Einfluß auf die Strömung.

Eine zweite Gruppe von aerodynamischen Problemen betrifft die schwingende Bewegung des Flügels und somit die Tatsache, daß die Umströmung der Fläche nicht stationär ist. Die instationäre Tragflügeltheorie, welche wir für einen theoretischen Überblick zu Rate ziehen müssen[1]), hat gezeigt, daß die physikalischen Vorgänge dabei durch einen neuen Parameter ν, die reduzierte Frequenz, gekennzeichnet sind. $\nu = ns/v$ wird aus der Frequenz n des Flügelschlags, der Halbspannweite s und der Anströmgeschwindigkeit v gebildet[2]). Für Vorgänge am Flügelschnitt ist die mit der halben Flügeltiefe $l/2$ gebildete reduzierte

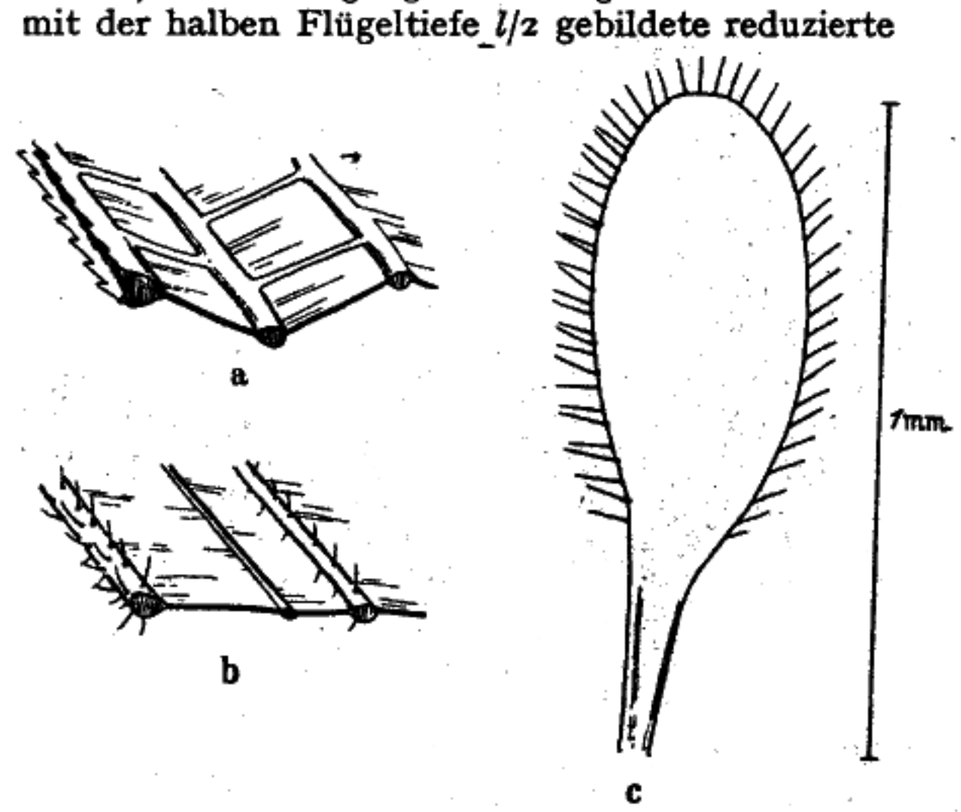

Fig. 6. Turbulenzerzeugende Vorrichtungen an Insektenflügeln: *a*) Schnitt durch die Vorderkante eines Libellenflügels (Calopteryx) mit zwei Reihen von Zähnen, *b*) durch die entsprechende Zone eines Mückenflügels (Tipula) mit allseitiger Beborstung der Vorderkante, *c*) Flügel einer Gallmücke (Oligarces) mit behaartem Rande. (Der Vergrößerungsmaßstab ist in den 3 Fällen etwa gleich.)

Frequenz maßgebend. — Bei $\nu = 0$ ist die Bewegung stationär, mit wachsendem ν macht sich

[1]) Der Begriff der Reibungsschicht wurde von L. PRANDTL eingeführt und beruht auf der Vorstellung, daß Zähigkeitswirkungen nur in unmittelbarer Wandnähe eine Rolle spielen, während im Außenraum mit einer idealen, reibungslosen Strömung gerechnet werden kann.

[1]) Vgl. H. G. KÜSSNER [Luftfahrtforsch. 13, 410 (1936); 17, 370 (1940)].

[2]) $1/\nu = \lambda/s$ bedeutet die auf die Halbspannweite s bezogene Wellenlänge λ.

zunächst der Einfluß der durch die Zirkulationsänderung periodisch abgehenden Wirbel und dann der Einfluß der Massenbeschleunigungen der Luft bemerkbar. Ist ν klein (etwa in der Größenordnung 0,1—0,2), so kann man die instationären Einflüsse vernachlässigen und annehmen, daß in jedem Zeitpunkt näherungsweise die Strömungsverhältnisse herrschen, wie sie im stationären Falle sein würden.

Die reduzierten Frequenzen der mittleren bis größeren Vögel im Horizontalflug bewegen sich nach verschiedenen vorliegenden Daten um 0,1 [z. B. Wanderfalke um 0,06, Taube um 0,08, Krähe um 0,11, Rebhuhn um 0,12[1])]. Man könnte daher versuchen, hier mit einer quasistationären Theorie auszukommen. Eine solche für den Fall einer einfachen Bewegung (wobei der Flügel als Ganzes auf- und abschwingt) soll weiter unten gebracht werden. — Bei vielen Insekten und manchen kleinen Vögeln, ebenso bei größeren für Start und Landung, dürfte die reduzierte Frequenz jedoch wesentlich größer sein. Im Extremfall des Fliegens auf der Stelle, wobei die Flügel meist in annähernd horizontaler Bahn bewegt werden (Kolibri, viele Insekten), könnte man eine Theorie in Anlehnung an die beim Hubschrauber entwickelten Vorstellungen versuchen, worauf in diesem Aufsatz jedoch nicht näher eingegangen sei.

III.

Die bisherigen Darlegungen dienten der näheren Erläuterung unserer Meinung, daß eine theoretisch-experimentelle Aufklärung des Tierfluges sowohl der Biologie als auch der Technik und Aerodynamik fruchtbare Dienste leisten könnte. Welche Möglichkeiten stehen nun zur Erforschung des Gebietes heute zur Verfügung?

Auf rein biologischer Seite sind die Methoden, insbesondere die physiologischen (Muskel-, Nerven-, Sinnesphysiologie usw.), im allgemeinen weit genug entwickelt, um die Beschäftigung mit den Problemen der tierischen Flugbewegung aussichtsreich zu machen. Für die kinematisch-technische Seite werden gute, unter völlig natürlichen sowie unter verschiedenen experimentellen Bedingungen hergestellte Zeitlupenfilme unentbehrlich sein. Die experimentelle Erforschung der tierischen Flugmechanik findet freilich allenthalben ihre Grenzen in der Tatsache, daß es sich um Lebewesen handelt, die auf jeglichen Zwang mit gestörter oder abgeänderter Funktion reagieren, wodurch sich viele notwendige Messungen, etwa im Windkanal, sowie Versuche über den Leistungsbedarf beim Fliegen usw. von selbst verbieten. Diese Tatsache hat den einen von uns (v. H.) veranlaßt, auf Grund mehrjähriger umfangreicher Versuche an Tieren und mit verschiedenartigen (zum Teil neukonstruierten) Getrieben sowie mit in verschiedener Weise bewegten Flügeln, Schwingenflugmodelle zu entwickeln, die in allen wesentlichen Merkmalen die verschiedenen tierischen Flugformen nachahmen. An ihnen lassen sich, wie weiter unten gezeigt sei, genauere Messungen leichter durchführen, da man hier alle wirksamen Kausalfaktoren in der Hand hat. — Der Begriff des „Modellversuchs" hat in Biologie und Technik eine verschiedene Färbung. Biologische Modelle (etwa der Protoplasmabewegung, der Nervenleitung, der nervösen Koordination) geben, wie heute wohl allgemein zugegeben wird, nur formale Analogien und haben somit hauptsächlich heuristischen und didaktischen Wert. Modellversuche in der Technik (etwa Windkanaluntersuchungen oder Versuche an freifliegenden Modellen, wie sie z. B. beim Studium des Trudelns mit Erfolg benutzt werden) betreffen bereits den Gegenstand selbst, nur unter vorgegebenen, die Sachlage vereinfachenden Bedingungen. Diese Möglichkeit, zu vereinfachen, von vielen mitwirkenden Faktoren jeweils nur einen zu variieren und so seine Rolle im Rahmen des Ganzen zu erkennen, bietet auch die Untersuchung freifliegender Schwingenmodelle. Sie wird daher besonders als Bindeglied zwischen der Theorie und den Flugverfahren in der Natur unentbehrlich sein.

IV.

Um einen genaueren Einblick in die beim Schwingenschlage vorliegenden Bedingungen zu erhalten, sei als Diskussionsgrundlage im folgenden eine quasistationäre Theorie entwickelt, die von einer vereinfachten Bewegung des Flügels ausgeht. Es sei dabei angenommen, der Flügel schwinge als Ganzes auf und nieder, führe also an jeder Stelle des Querschnitts die gleiche Bewegung aus.

In einem raumfesten Koordinatensystem (x-Achse horizontal, positiv nach vorn; z-Achse vertikal, positiv nach oben; Längeneinheit: Halbspannweite s; $x/s = \xi$; $z/s = \zeta$) verlaufe die Bewegung eines Punktes des Flügelmittelschnitts in der Bahn

$$\zeta(\xi) = a \cos 2\pi\nu\xi$$

wobei a die Amplitude der Schlagschwingung (in Halbspannweiten gemessen) und $\nu = ns/v$ [mit n = Schlagfrequenz, v = (konstante) Bahngeschwindigkeit] die reduzierte Frequenz bedeutet, welche wir, wie oben dargelegt wurde, als kleine Größe ansehen wollen. Der Flügel soll ferner noch relativ zur jeweiligen Anströmrichtung seinen Anstellwinkel α um einen Mittelwert α_0 mit der Amplitude α_1 periodisch ändern:

$$\alpha(\xi) = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(2\pi\nu\xi - \varphi).$$

Dabei ist zunächst eine Phasendifferenz φ zwischen Schlagschwingung und Anstellwinkelschwingung zugelassen, deren Optimum wir später bestimmen werden. Wir können nun die sich aus dieser Bewegung ergebenden Kräfte bestimmen. Als Einheit der Kräfte wählen wir wie üblich $\frac{\varrho}{2} v^2 F$,

[1]) Es gibt zwar zahlreiche Messungen von Geschwindigkeiten und Schlagzahlen, aber leider keine zusammengehörigen unter dem Gesichtspunkt der reduzierten Frequenz, weshalb den angegebenen Zahlen eine gewisse Unsicherheit zukommt.

wobei ϱ die Dichte des Mediums und F die Flügelfläche ist. Für die Luftkraft senkrecht zur jeweiligen Anströmrichtung (Auftrieb c_a) erhalten wir nach der Prandtlschen Tragflächentheorie und unter der Voraussetzung elliptischer Auftriebsverteilung über die Spannweite (was keine wesentliche Einschränkung bedeutet) einen linearen Zusammenhang mit dem Anstellwinkel:

$$c_a(\xi) = c'_a \cdot \alpha(\xi)$$

mit

$$c'_a = dc_a/d\alpha = \frac{2\pi}{1 + 2/\Lambda} = \text{const},$$

wobei mit Λ das Seitenverhältnis $4s^2/F$ des Flügels bezeichnet ist. Die Luftkraft in Richtung der jeweiligen Anströmung (Widerstand c_w) setzt sich aus dem induzierten Widerstand c_{wi}, welcher quadratisch von c_a abhängt, und dem Profilwiderstand c_{wp}, welcher als vom Anstellwinkel unabhängig angenommen wird, zusammen:

$$c_w(\xi) = \frac{c_a^2(\xi)}{\pi\Lambda} + c_{wp}.$$

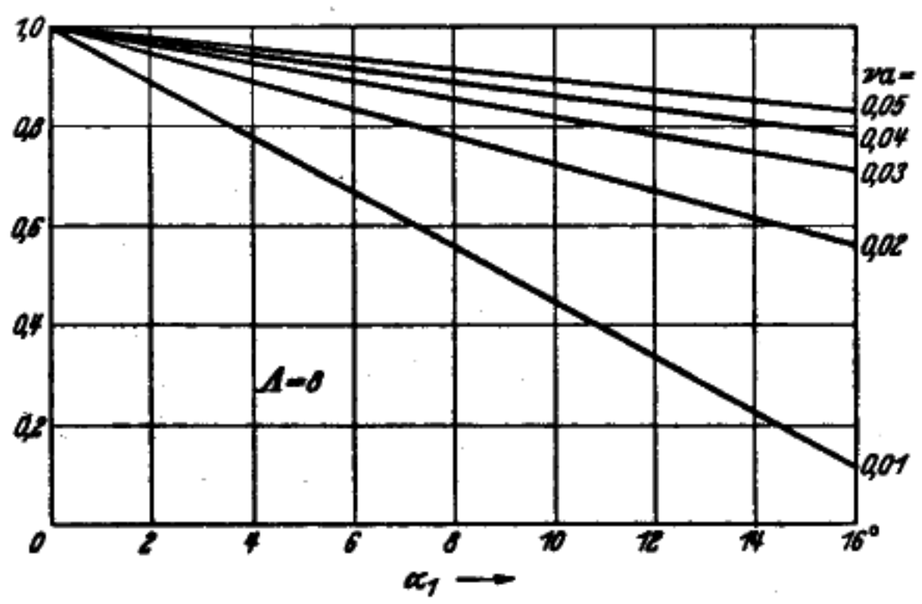

Fig. 7 Vortriebswirkungsgrad für den als Ganzes schwingenden Flügel.

Es interessieren uns nun vor allem die Komponenten der Luftkraft c_z in vertikaler und c_x in horizontaler Richtung. Wir bezeichnen mit

$$\gamma(\xi) = -\frac{d\zeta}{d\xi} = 2\pi\nu a \sin 2\pi\nu\xi$$

den Winkel zwischen der Bahn (Anströmrichtung) und der Horizontalen an jeder Stelle ξ, welcher nach unseren Voraussetzungen als klein angenommen werden kann, so daß $\sin\gamma \approx \gamma$, $\cos\gamma \approx 1$ ist; dann bestehen zwischen c_x, c_z und c_a, c_w die Beziehungen[1])

$$c_z = c_a + c_w \cdot \gamma \approx c_a,$$
$$c_x = -c_a \cdot \gamma + c_w.$$

Damit haben wir die Mittel an der Hand, in jedem Bahnpunkt Horizontal- und Vertikalkraft zu bestimmen. Wir rechnen noch ihre Mittelwerte über eine Wellenlänge der Schwingung aus:

$$\bar{c}_z = \nu\int_0^{1/\nu} c_z(\xi)\,d\xi = \frac{2\pi}{1 + 2/\Lambda}\alpha_0 = c'_a \cdot \alpha_0 = c_{a0}$$

[1]) Vertikalkräfte haben nach oben, Horizontalkräfte nach hinten positives Vorzeichen. Daher erscheint ein Vortrieb mit negativem Vorzeichen.

und entsprechend

$$\bar{c}_x = -\pi c'_a \cdot \sin\varphi \cdot \nu a \cdot \alpha_1 + \frac{c_{a_0}^2}{\pi\Lambda}\left(1 + \frac{\alpha_1^2}{2\alpha_0^2}\right) + c_{wp},$$

wobei $c_{wi_0} = c_{a_0}^2/\pi\Lambda$ der induzierte Widerstand ist, welchen der Flügel haben würde, wenn er stationär unter dem Winkel α_0 angeströmt würde. Diese Gleichung zeigt uns, daß die mittlere Vertikalkraft $\bar{c}_z$ durch die Schwingenbewegung nicht geändert wird, und daß wir in der Tat außer einem zusätzlichen induzierten Widerstand (Schwingenwiderstand)

$$\frac{c_{a_0}^2}{\pi\Lambda} \cdot \frac{\alpha_1^2}{2\alpha_0^2} = \frac{c'^2_a}{2\pi\Lambda} \cdot \alpha_1^2$$

(welcher übrigens genau halb so groß wie der zu einer stationären Anströmung unter α_1 gehörige

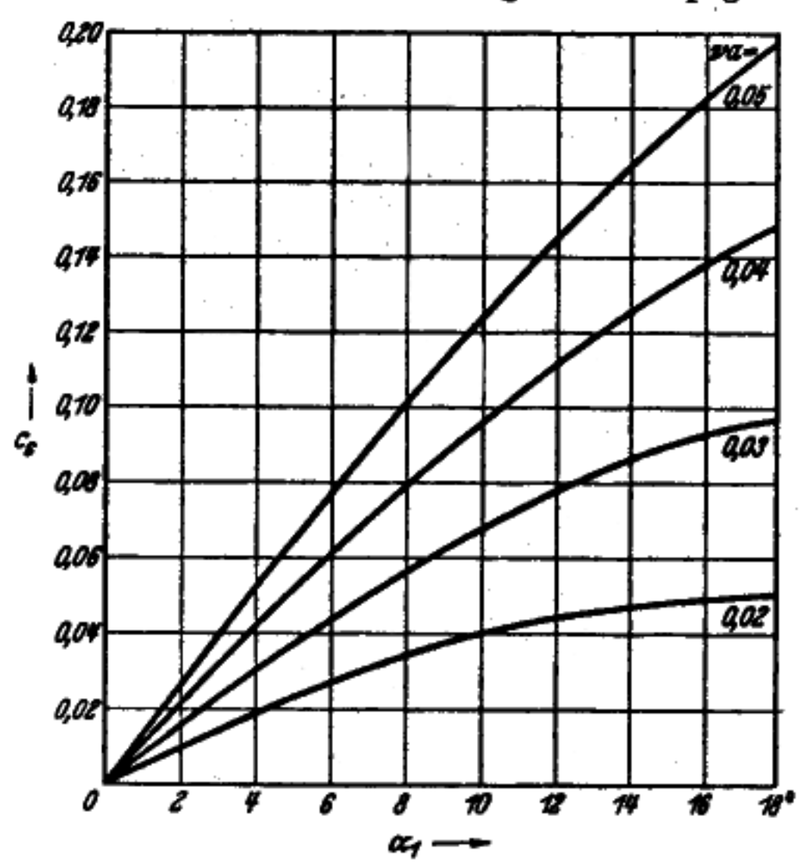

Fig. 8. Die durch den als Ganzes schwingenden Flügel erreichten Schubbeiwerte $\bar{c}_z$.

ist) auch eine nach vorn wirkende Kraft, den Schwingenvortrieb

$$-\pi c'_a \sin\varphi \cdot \nu a \cdot \alpha_1$$

erhalten. Um diesen möglichst groß zu machen, müssen wir zunächst $\varphi = \pi/2$ setzen: Die Anstellwinkelschwingung muß der Schlagschwingung um $\pi/2$ nacheilen, was unmittelbar anschaulich ist. Weiter erkennt man die Notwendigkeit einer Anstellwinkeländerung, denn für $\alpha_1 = 0$ erhält man im Mittel keinen Vortrieb. Der Vortrieb wird größer mit zunehmender Schlagamplitude νa[1]) und mit zunehmender Anstellwinkelamplitude α_1. Beide sind jedoch nach oben begrenzt: ν durch die Voraussetzungen der quasistationären Theorie, a im praktischen Falle aus konstruktiven Gründen und α_1 durch die Forderung, daß der maximale Anstellwinkel $\alpha_0 \pm \alpha_1$ nicht zum Abreißen der Strömung am Profil führen darf.

Da der durch die Schwingenbewegung gleichzeitig hervorgerufene Widerstand quadratisch mit α_1 wächst, wird es zweckmäßig sein, zu überlegen,

[1]) $\nu a = as/\lambda$ ist die auf die Wellenlänge λ bezogene Schlagamplitude.

bei welchen Schlag- und bei welchen Anstellwinkelamplituden der betrachtete Schwingenantrieb die günstigsten Ergebnisse liefert. Wir definieren daher einen Vortriebswirkungsgrad[1])

$$\eta = 1 - \frac{\text{Schwingenwiderstand}}{\text{Schwingenvortrieb}} = 1 - \frac{1}{\pi(\Lambda + 2)} \cdot \frac{\alpha_1}{\nu a}.$$

Der Vortriebswirkungsgrad ist demnach um so größer, je größer die Schlagamplitude νa und je kleiner die Anstellwinkelamplitude α_1 ist (siehe Fig. 7). Ein größeres Seitenverhältnis des Flügels setzt η ebenfalls herauf. Abgesehen von der sehr kleinen Schlagamplitude $\nu a = 0{,}01$ finden wir Wirkungsgrade, die denen beim Propellerantrieb im Flugzeugbau gleichkommen. Ob man die außergewöhnlich guten Wirkungsgrade bei kleinen Anstellwinkelamplituden α_1 praktisch ausnutzen kann, hängt davon ab, ob der damit hervorgerufene Schub $\bar{c}_x$ (= Schwingenvortrieb + Schwingenwiderstand)

$$\bar{c}_x = -\pi c_a' \sin\varphi\, \nu a\, \alpha_1 + \frac{c_a'^2}{2\pi\Lambda}\alpha_1^2$$

ausreicht, den gegebenen stationären Widerstand zu überwinden. Um diese Frage schneller zu überblicken, ist in Fig. 8 der Schub $\bar{c}_x$ über α_1 für verschiedene νa aufgetragen. (Für ein Flugzeug einschließlich Rumpf und Fahrwerk liegt der zu überwindende Widerstand $\bar{c}_w$ im Horizontalflug in der Größenordnung 0,05.)

Um von vornherein für die spätere Anwendung klare Verhältnisse zu schaffen, seien einige übersichtliche Beispiele besprochen. Für einen gegebenen Flügel haben wir drei voneinander unabhängige freie Parameter: Den mittleren Anstellwinkel α_0 (oder entsprechend c_{a_0}), die Anstellwinkelamplitude α_1 und die Schlagamplitude νa. Eine einfache Bewegung wäre die, daß der Anstellwinkel — maßgebend für die auftretenden Luftkräfte ist der Anstellwinkel gegenüber der jeweiligen Anströmrichtung, von dem hier allein die Rede ist, nicht der gegen die Horizontale — sich nicht ändert ($\alpha = \alpha_0 = \text{const}$; $\alpha_1 = 0$). Wir erhalten dann in jedem Bahnpunkt den gleichen Auftrieb c_{a_0}, während der beim Flügelabschlag entstehende Vortrieb durch den entsprechenden Rücktrieb beim Aufschlag wieder aufgehoben wird (Fig. 9a). — Einen anderen Grenzfall erhalten wir, wenn wir $\alpha_0 = 0$ setzen und dafür α_1 von Null verschieden annehmen. In diesem Fall wird der beim Abschlag entstehende Auftrieb durch den entsprechenden Abtrieb beim Aufschlag kompensiert. Dafür erhalten wir für beide Bewegungsphasen übereinstimmend einen (allerdings in seiner Größe periodisch schwankenden) Vortrieb (Fig. 9b, ausgezogene Kurven). — Zwischen diesen Extremen sind verschiedene Zwischenformen denkbar. Von Fig. 9b ausgehend, erhalten wir bei kleinem mittlerem Anstellwinkel einen dementsprechend kleinen von Null verschiedenen mittleren Auftrieb (Fig. 9c). Fig. 9d stellt den besonderen, später noch zu erwähnenden Fall dar, wo nirgends Abtrieb auftritt, aber Vortrieb und Auftrieb beim Aufschlag vorübergehend Null werden. In Fig. 9e nähern wir uns dem Fall a; wir haben zwar eine entsprechend der kleinen Anstellwinkelschwankung geringe Auftriebsschwankung, dafür aber nur kleinen Vortrieb. Die hier noch eingezeichneten gestrichelten Kurven deuten an, wie sich die Situation verkehrt, wenn die Anstellwinkelschwingung der Schlagschwingung nicht um $\pi/2$ nach-, sondern voreilt, ein Fall, auf den auch noch zurückzukommen sein wird.

Bisher war die Voraussetzung gemacht, daß sowohl die Schlag- als auch die Anstellwinkelschwingung rein sinusförmig verlaufen. Daß diese Tatsache die Allgemeingültigkeit der Anwendung des hier Vorgetragenen nicht beeinträchtigt, sei noch kurz dargetan. Es ergibt sich das einmal schon aus der Tatsache, daß man beliebige Kurven in harmonische Schwingungen auflösen kann. Für eine nicht sinusförmige Bahnkurve $\zeta(\xi)$ läßt sich auch auf andere Weise unser Satz, daß ohne Anstellwinkeländerung im Mittel kein Vortrieb entstehen kann, leicht einsehen. Wir setzen nur voraus, daß $\zeta(\xi)$ eine periodische Funktion (mit der Periode $\lambda/s = 1/\nu$) ist:

$$\zeta(\xi_0) = \zeta(\xi_0 + 1/\nu)$$

Sei $\alpha = \alpha_0 = \text{const}$, so ist auch $c_a = c_{a_0} = \text{const}$ und $c_{w_0} = \text{const}$. Der mittlere Vortrieb:

$$\bar{c}_x = \nu \int_{\xi_0}^{\xi_0 + 1/\nu} c_x(\xi)\, d\xi$$

ist dann wegen $c_x(\xi) = -c_{a_0} \cdot \gamma(\xi) + c_{w_0}$ und $\gamma(\xi) = -d\zeta/d\xi$ gleich:

$$\bar{c}_x = c_{a_0}\nu[\zeta(\xi_0 + 1/\nu) - \zeta(\xi_0)] + c_{w_0} = c_{w_0}.$$

Ein Beispiel für eine solche Bewegung zeigt Fig. 9f.

Auch den Fall einer nicht sinusförmigen Anstellwinkelschwingung kann man nach der angegebenen Methode behandeln. Fig. 9b gibt in den gestrichelten Kurven ein Beispiel.

Eine weitere Voraussetzung war die konstante Anströmgeschwindigkeit. Schwankt diese um einen Mittelwert v_0 nach

$$v(\xi) = v_0 + \Delta v(\xi) = v_0\left(1 + \frac{\Delta v(\xi)}{v_0}\right)$$

um den kleinen Beitrag Δv, so läßt sich nach der PRANDTLschen Tragflügeltheorie leicht zeigen, daß dieser Geschwindigkeitsänderung Δv eine Anstellwinkeländerung

$$\Delta\alpha = \alpha \frac{\Delta v}{v_0}$$

entspricht, womit der Anschluß an unsere früheren Überlegungen hergestellt ist. Auf diesem Wege würden wir also z. B. auch für den Fall konstanten

[1]) Dieser ist (für $\bar{c}_x = 0$) gleichzeitig das Verhältnis zwischen der Leistung, die wir hineinstecken müssen, um nur den stationären Anteil $c_{wi_0} + c_{wp}$ des Widerstandes zu überwinden, und der Leistung, die wir tatsächlich aufwenden müssen, und welche um den Betrag Schwingenwiderstand × Fluggeschwindigkeit größer ist als die erste.

Anstellwinkels $\alpha = \alpha_0$ einen im Mittel nicht verschwindenden Vortrieb erhalten.

Wir sind bisher auf den dritten Parameter, die Schlagamplitude νa, nicht weiter eingegangen. Die Bewegung des tierischen Flügels unterscheidet sich bekanntlich von der eben behandelten vor allem darin, daß der Flügel am Rumpf angelenkt ist, so daß die Schlagamplitude nach dem Flügelende hin zunimmt. Die Theorie wäre also dahin zu erweitern, daß a als von der Koordinate y in Spannweitenrichtung abhängig angesetzt wird. Diese Bewegung bringt gegenüber der theoretisch behandelten neben unwesentlichen Nachteilen vor allem praktische Vorteile mit sich. Der Hauptnachteil läge darin, daß die Auftriebsverteilung nicht mehr elliptisch wäre, was eine Zunahme des induzierten Widerstandes zur Folge hätte. Es wäre allerdings eine Bewegung denkbar, bei der die zunehmende Schlagamplitude mit einer solchen Abnahme des Anstellwinkels einhergeht, daß die elliptische Auftriebsverteilung bestehenbleibt. Diese Bewegungsart hätte aber mit der als Ganzes auf- und abschwingenden Platte einen entscheidenden Nachteil gemein: die große Schwankung der Vertikalkraft im Verlaufe einer Schwingung. Diese Schwankung aber muß zu einer um so stärkeren Auf- und Abbewegung des Massenschwerpunktes

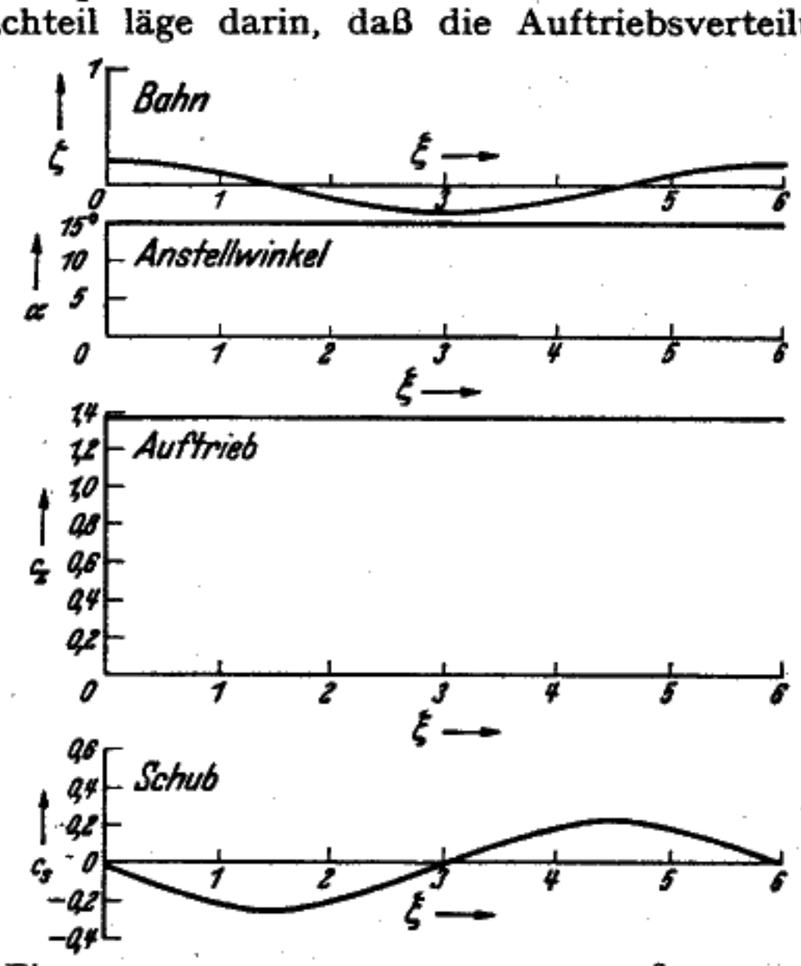

Fig 9a. $a = 0{,}2$; $\nu a = 0{,}033$; $\alpha_0 = 15°$; $\alpha_1 = 0$; $\bar{c}_z = 1{,}37$; $\bar{c}_s = 0$.

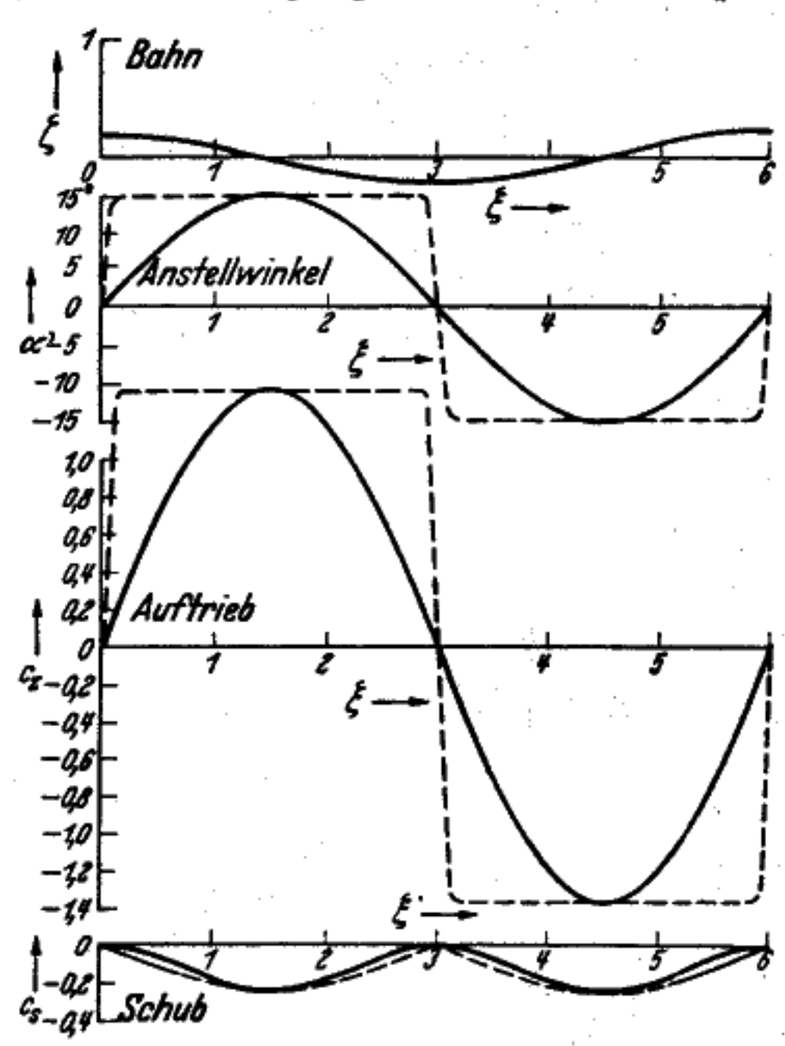

Fig. 9b. — $a = 0{,}2$; νa $0{,}033$; $\alpha_0 = 0$; $\alpha_1 = 15°$; $\bar{c}_z = 0$; $\bar{c}_s = -0{,}11$; $\eta = 0{,}79$.

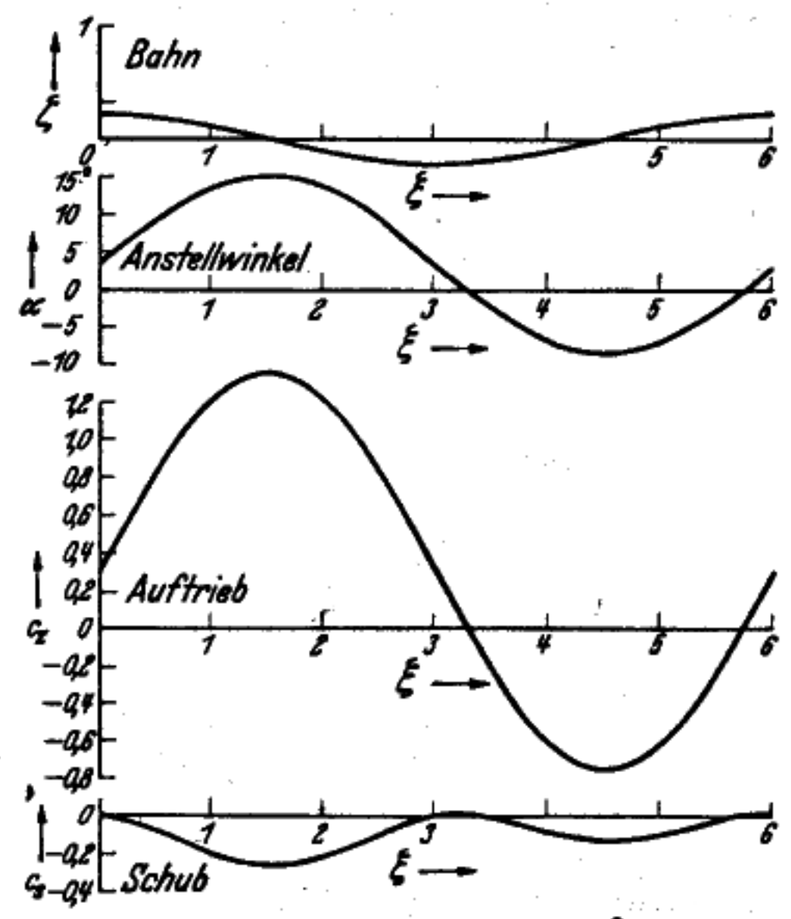

Fig. 9c. $a = 0{,}2$; $\nu a = 0{,}033$; $\alpha_0 = 3{,}75°$; $\alpha_1 = 11{,}25°$; $\bar{c}_z = 0{,}34$; $\bar{c}_s = -0{,}09$; $\eta = 0{,}84$.

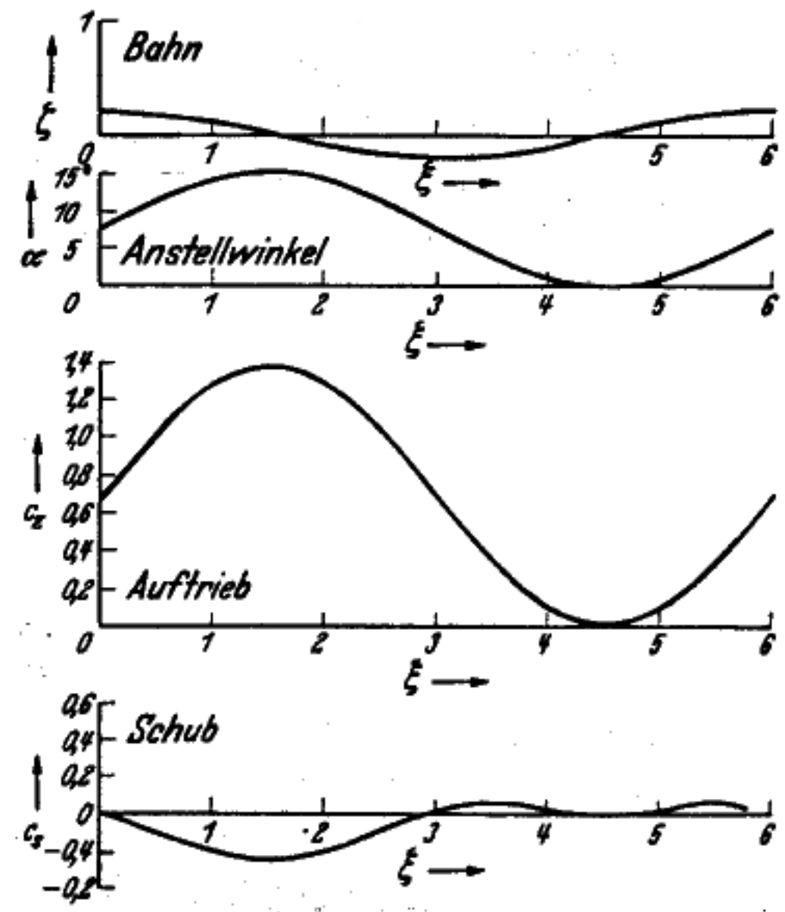

Fig. 9d. $a = 0{,}2$; $\nu a = 0{,}033$; $\alpha_0 = 7{,}5°$; $\alpha_1 = 7{,}5°$; $\bar{c}_z = 0{,}68$; $\bar{c}_s = -0{,}064$; $\eta = 0{,}90$.

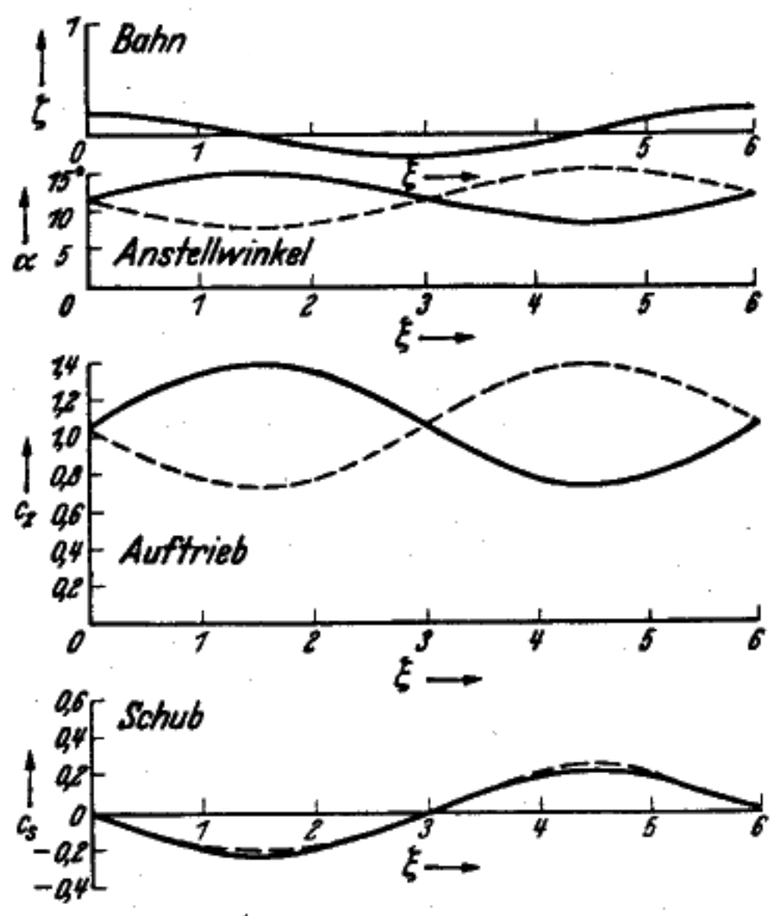

Fig. 9e. —— $\varphi = \pi/2$; $a = 0{,}2$; $\nu a = 0{,}033$; $\alpha_0 = 11{,}25°$; $\alpha_1 = 3{,}75°$; $\bar{c}_z = 1{,}03$; $\bar{c}_s = -0{,}034$; $\eta = 0{,}95$.
—— $\varphi = -\pi/2$; $a = 0{,}2$; $\nu a = 0{,}033$; $\alpha_0 = 11{,}25°$; $\alpha_1 = 3{,}75°$; $\bar{c}_z = 1{,}03$; $\bar{c}_s = 0{,}034$; $\eta = 0{,}95$.

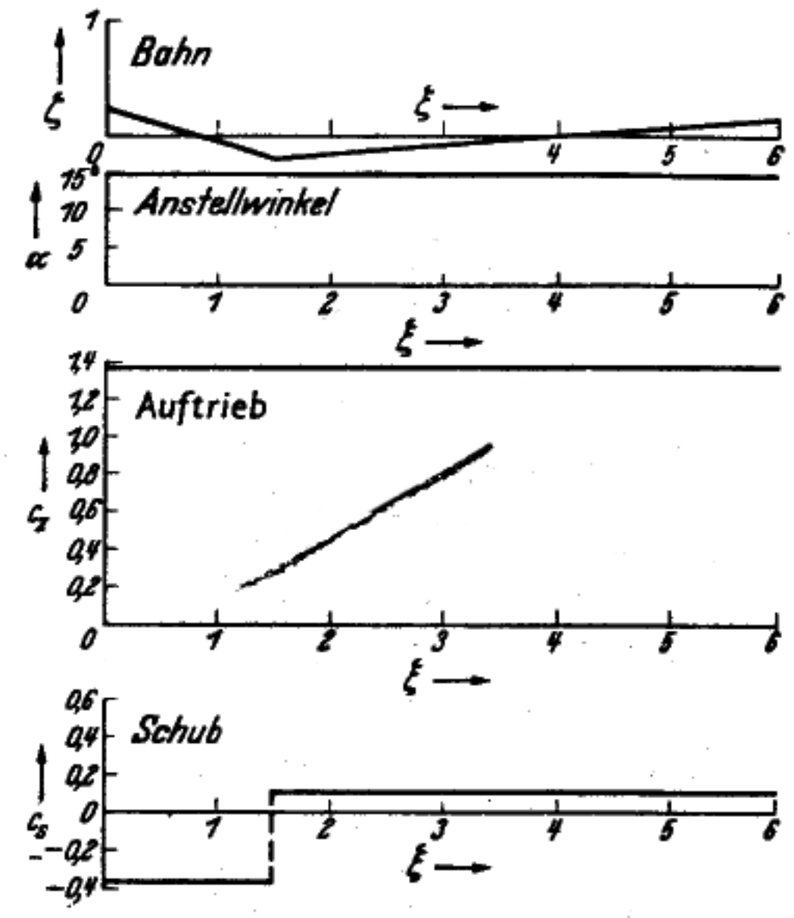

Fig. 9f. $a = 0{,}2$; $\nu a = 0{,}033$; $\alpha_0 = 15°$; $\alpha_1 = 0$; $\bar{c}_z = 1{,}37$; $\bar{c}_s = 0$.

Fig. 9. Verschiedene Bewegungsformen und die zugehörigen Luftkräfte im Verlaufe einer Schwingung für den als Ganzes schwingenden Flügel.

führen, je geringer ceteris paribus die Schlagfrequenz ist. Betrachtet man nun daraufhin große, langsam schlagende Vögel, so ist von einer nennenswerten vertikalen Pendelbewegung des Rumpfes (im Horizontalflug) nichts zu beobachten; nur sehr langflügelige und zugleich leicht flächenbelastete Formen (z. B. Seeschwalben) zeigen diese Bewegung in merklichem, aber immer noch geringem Ausmaß. Die Kompensation dieser Vertikalbewegung wird aber gerade bei einer Winkelschwingung, wie sie der tierische Flügel ausführt, dadurch möglich gemacht, daß die einzelnen Flügelzonen verschiedene Schlagamplituden haben und deshalb verschiedene Funktionen übernehmen können. Auf welche Weise dies möglich ist, soll im folgenden Abschnitt an Hand der Flugmodelle erläutert werden.

V.

Auf die Geschichte des Schwingenflugmodellbaus („Vollschwingen"-M.), — ein langes Kapitel, wenn man die Zahl derer zum Maßstab nimmt, die sich auf dem Gebiet versucht haben, ein ganz kurzes, wenn man das Ergebnis betrachtet —, sei an dieser Stelle nicht näher eingegangen; soweit uns bekannt, ist über die lange zurückliegenden Ergebnisse PÉNAUDS, der um 1870 ein kleines Modell mit elastischen Flügeln mittels Gummimotor und einfachem Kurbelgetriebe (in einer Bewegung, die man allenfalls als „Rütteln" bezeichnen könnte) zum Steigen brachte, niemand wesentlich hinausgekommen. Die Hauptschwierigkeiten einer naturgetreuen Darstellung der Bewegung beruhen einmal in der richtigen kombinierten Schlag- und Drehbewegung des Flügels, zum zweiten in der nicht minder wichtigen, aber anscheinend stets außer acht gelassenen richtigen Kraftverteilung (das fast immer verwendete Schubkurbelgetriebe ist für diesen Zweck ungeeignet, vgl. auch Fig. 10), und schließlich in der Herstellung einer stabilen Fluglage. Eine eingehendere Beschreibung, wie diese 3 Aufgaben bei den von uns konstruierten Flugmodellen gelöst sind, würde hier zu weit führen. Die folgenden allgemeinen Angaben mögen genügen.

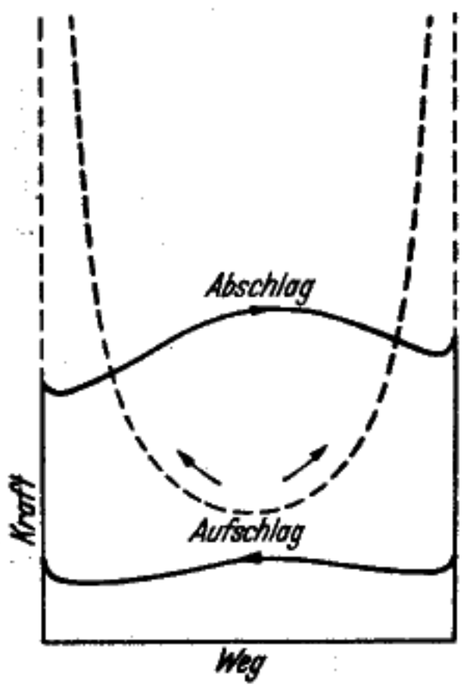

Fig. 10. Verlauf der vom Motor auf den Flügel ausgeübten Kraft während einer Schwingung bei dem als Beispiel behandelten Flugmodell (vgl. Fig. 13). Zum Vergleich die Kraftverteilung bei einem Schubkurbelgetriebe (gestrichelte Kurve).

Was die Flügelbewegung selbst anlangt, so sind hier Schlagamplitude, Anstellwinkeländerung und Verwindung der Fläche längs der Spannweite variabel und beliebig einstellbar. Die Kraftverteilung während einer Schlagphase ist ebenfalls in weiten Grenzen veränderlich, ebenso kann das Kraftverhältnis zwischen Ab- und Aufschlag, das ja auch bei den einzelnen tierischen Flugarten sehr wechselt, beliebig eingestellt werden. Ein Ausgleichsgetriebe sorgt dafür, daß sich die im Ver-

lauf der Flügelschläge nachlassende Spannung des Gummimotors nicht auf die Flugbewegung auswirken kann; die Flügelschläge können nach Wunsch mit gleichbleibender oder allmählich oder plötzlich steigender bzw. sinkender Kraft ausgeführt werden. Die Flugmodelle können leicht vom Boden starten und im Winkel bis über 45° steigen, manche auch vorübergehend auf der Stelle rütteln. Die Flugdauer beträgt bei den bisher gebauten Modellen von 0,3 bis 2,2 m Spannweite 20 bis 60 sec; an den Kraftflug schließt sich ein Gleitflug an. Die allgemeine Stabilität, auch bei Nur-Flügelmodellen, ist über Erwarten gut, selbst in stärker bewegter Luft. Einige typische Flugbilder geben die Fig. 11 und 12. Es sei noch erwähnt, daß es uns vorerst allein darauf ankam, überhaupt die Möglichkeit einer Darstellung tierischer Flugformen zu erweisen — in der Hauptsache beschäftigten uns bisher die Flugarten der mittelgroßen bis großen Vögel, der Fledermäuse, der Flugsaurier[1]), der Libellen und der größeren Tagfalter —; ins einzelne gehende Übereinstimmung mit der Bewegungsart eines bestimmten Flugtieres wurde bisher nicht angestrebt, wird aber auf der vorliegenden Grundlage ohne sehr große Schwierigkeit zu erreichen sein[2]). Für den hier von uns verfolgten Zweck, den „Existenzbeweis" für die neue Methode zu erbringen, mag es genügen, von einem einzelnen Beispiel genauere Daten vorzulegen und an deren Hand einige bemerkenswerte Punkte etwas näher ins Auge zu fassen.

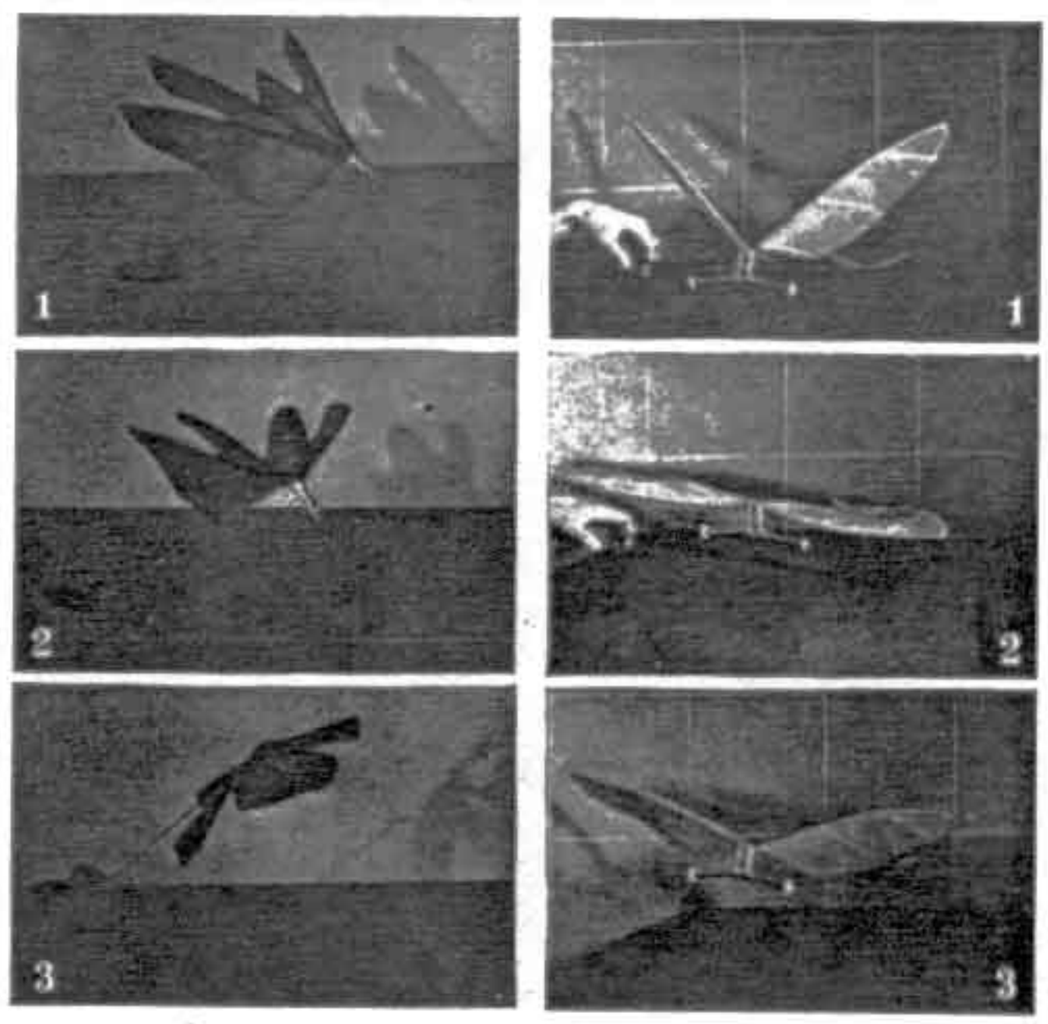

Fig. 11. Bilder aus Zeitlupenfilmstreifen von zwei Schwingenflugmodellen; links: Modell mit einfachem Spaltflügel, im Steigwinkel von etwa 40° „hochrüttelnd", rechts: ein anderes Modell beim Bodenstart (vgl. dazu die vom gleichen Modell aufgenommene Kurve Fig. 13). Reihenfolge der Bilder: 1. oberer Umkehrpunkt der Bewegung, 2. Abschlag, 3. Aufschlag. Der Gummimotor befindet sich beim linken Modell im Flügel (unter der Flügelvorderkante), beim rechten im unteren Querrohr des Fahrgestells.

Fig. 13 gibt die kurvenmäßige Auswertung einer mit Zeitlupenfilm festgehaltenen

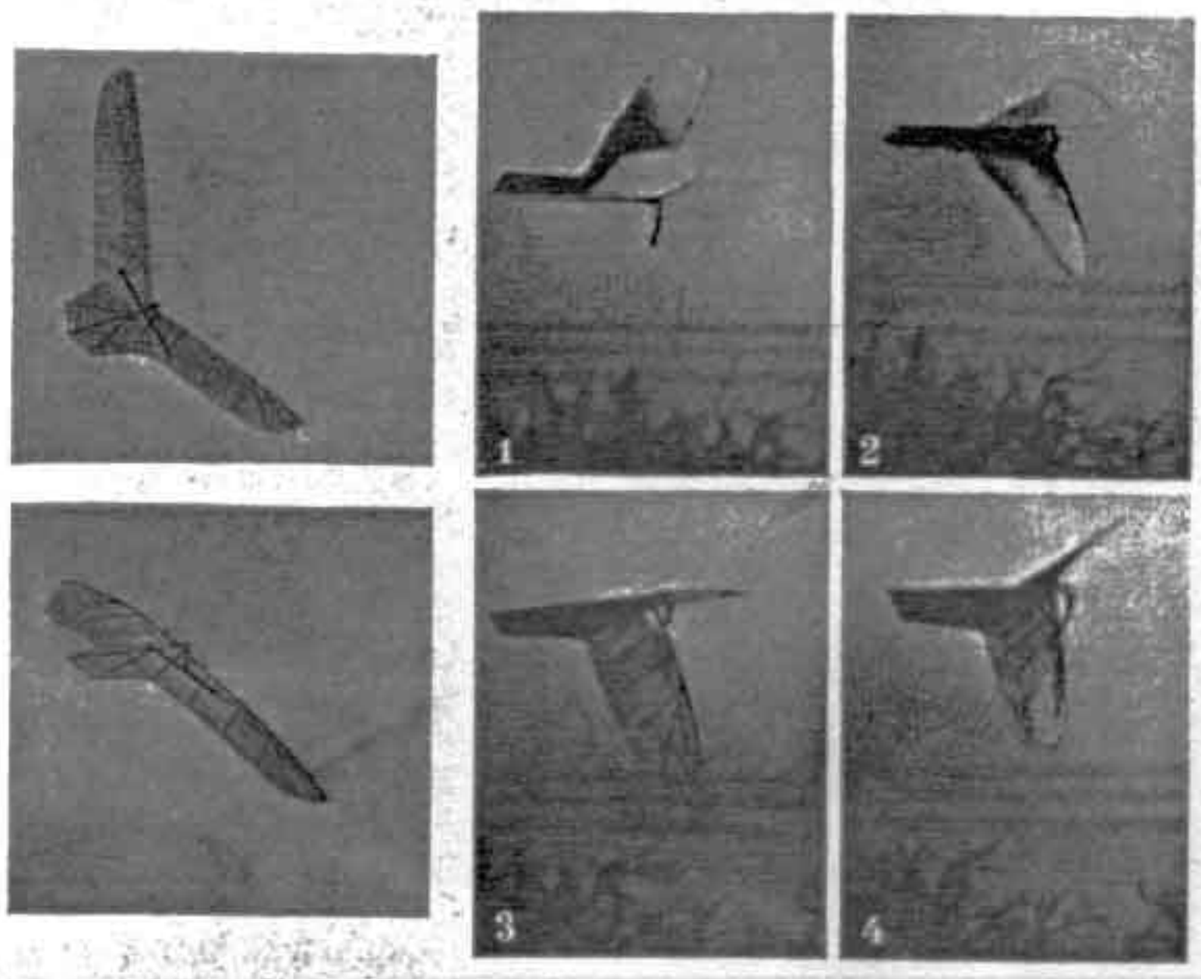

Fig. 12. Momentbilder eines im Freien fliegenden „Nurflügel"modells bei Ansicht von unten und von der Seite.

[1]) Über die Flugtechnik der Pterosaurier und ihre besonderen, interessanten Probleme soll an anderer Stelle auf Grund eingehender Modellversuche berichtet werden; hier sei nur erwähnt, daß auch die Flugweise mit Hilfe einer elastischen, lediglich an der Vorderkante eingespannten Flughaut, wie sie für diese Tiere typisch ist (der enorm verlängerte vierte Finger stellt den Spannbügel dar), im Modell nachgeahmt werden kann.

[2]) Verschiedene Modelle sind mehrfach der Öffentlichkeit vorgeführt worden; so z. B. beim Reichswettbewerb für Saalflugmodelle 1940 des NS.-Fliegerkorps in Breslau, wo sie durch Preise ausgezeichnet wurden; ferner vor der Lilienthal-Gesellschaft für Luftfahrtforschung in Berlin anläßlich eines am 29. I. 1941 gehaltenen Vortrags des einen Autors (v. H.). Beschreibungen der in Breslau gezeigten Flugleistungen finden sich bei W. Haas [Luftfahrt u. Schule 6, 22 (1940); im gleichen Heft auch ein Aufsatz v. H.s über denselben Gegenstand] und bei H. Winkler [Modellflug 6, 2 (1940)], der auch die Kinematik der Breslauer Modelle darstellt.

Flugstrecke, und zwar startet das Modell ohne Erteilung einer Anfangsgeschwindigkeit im „Sprungstart" vom Boden. Die mittlere Zone der Kurve zeigt das für diese Flugart typische Bild. Der Schwerpunkt führt erstens eine gewisse schwache, periodische Bewegung senkrecht zur mittleren Bahnrichtung aus. (Erwähnt sei, daß im Horizontalflug diese Pendelbewegung analog wie bei den Vögeln fast völlig verschwindet.) Zweitens zeigen sich periodische Geschwindigkeitsschwankungen, deren Ausmaß sich aus den durch gleiche Zeitintervalle getrennten Kurvenpunkten anschaulich ergibt: mit einer steilerwerdenden Bahn geht ein Geschwindigkeitsanstieg einher. Der Versuch, aus der Bewegung des Schwerpunktes Rückschlüsse auf die wirksamen Luftkräfte zu ziehen, mag hier unterbleiben. Auch auf die auffällige Tatsache, daß der als Folge des Flügelabschlags zu erwartende Geschwindigkeits- und Höhengewinn sich erst sehr verspätet (nämlich während des Aufschlages!) bemerkbar macht, sei nur hingewiesen. Bei der gegebenen Kraftverteilung für Flügelauf- und abschlag, die Fig. 10 wiedergibt, ist die mittlere Geschwindigkeit beider Bewegungsphasen (wie bei vielen Vögeln), etwa übereinstimmend. Eine geringe, aber deutliche Verzögerung bemerkt man jeweils am oberen Umkehrpunkt der Flügelbewegung: das Modell verharrt etwas länger in der stabilen Fluglage mit erhobenen, als in der instabilen mit gesenkten Flügeln.

In der nachfolgenden Zahlentafel sind außer einigen allgemeinen Angaben über das Modell eine Reihe ausgewerteter Daten für die mittlere Flugstrecke des Kurvenbildes 13 aufgeführt. Bei dem geringen Gewicht ist die Flächenbelastung des Modells um eine Größenordnung kleiner als die von Vögeln entsprechender Größe. Im Zusammenhang damit ist auch die mittlere Geschwindigkeit des Schwerpunktes erheblich geringer. Das bedingt aber bei der angegebenen, nicht in gleichem Maße verringerten Schlagfrequenz eine relativ hohe reduzierte Frequenz. Es wird u. a. eine Aufgabe der Zukunft sein, Schwingenmodelle herzustellen, die hinsichtlich Flächenbelastung, Geschwindigkeit — und somit REYNOLDSscher Zahl — sowie hinsichtlich der reduzierten Frequenz mit den betreffenden Flugtieren möglichst übereinstimmen.

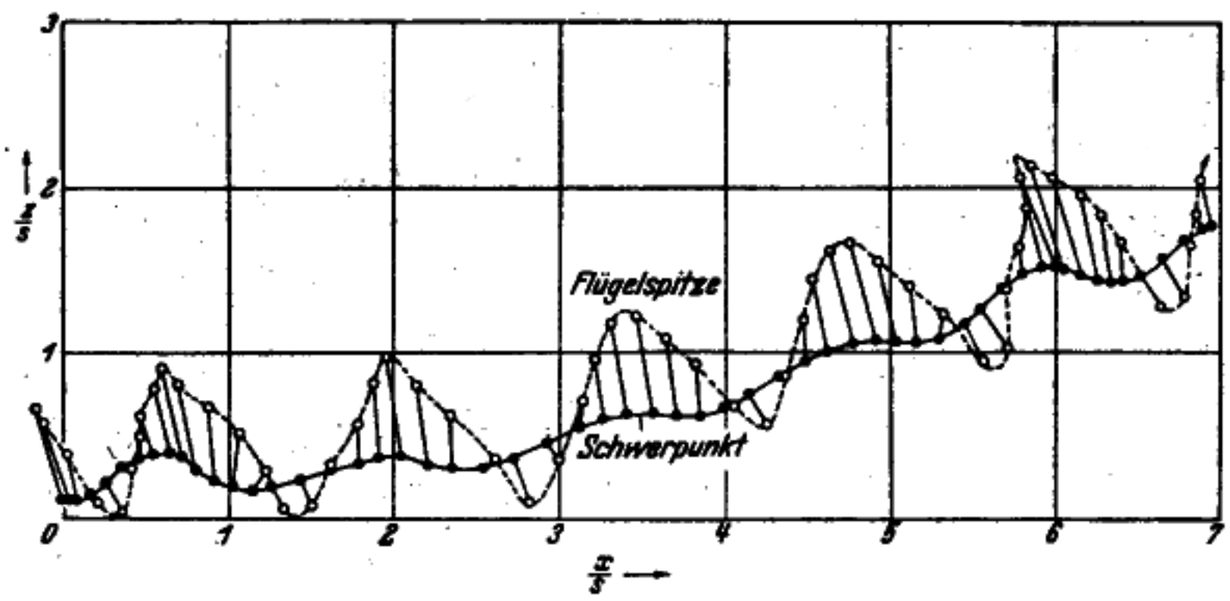

Fig. 13. Bewegung des Schwerpunkts und der Flügelspitze im Raum (x-Achse nach vorn, z-Achse nach oben; s = Halbspannweite) beim Start des als Beispiel behandelten Modells. Zeitlicher Abstand zweier Punkte: 3/80 sec. (Auswertung eines Filmstreifens mit 80 Bildern pro sec.)

Zahlentafel.

Spannweite $2s$	0,8 m
Flügelfläche F	0,07 m²
Gewicht G	0,007 kg
Flächenbelastung G/F	0,1 kg/m²
Motorleistung N	0,000 35 PS
Leistungsbelastung G/N	20 kg/PS
Schlagwinkel	60°
mittlerer Steigwinkel	18°
mittlere Frequenz n	2,7 sec⁻¹
mittlere Geschwindigkeit des Schwerpunktes $\bar{v}_s$	1,8 m/sec
mittlere Geschwindigkeit der Flügelspitze	3 m/sec
α_0 an der Flügelwurzel	≈ 15°
α_1 an der Flügelwurzel	≈ 5°
α_0 an der Flügelspitze	≈ 3°
α_1 an der Flügelspitze	≈ 17°
mittlerer Auftriebsbeiwert $\bar{c}_a$	0,49
mittlerer Widerstandsbeiwert $\bar{c}_w$	0,37
mittlerer Schubbeiwert $\bar{c}_s$	0,52
reduzierte Frequenz $\nu = ns/\bar{v}_s$	0,6
REYNOLDSsche Zahl $Re = \varrho \bar{v}_s F/2\mu s$	10^4

Die Leistungsbelastung erscheint im Vergleich mit den im Flugzeugbau üblichen Werten (2 bis 8 kg/PS) als außerordentlich hoch. Dabei ist jedoch zu beachten, daß dieser Wert von der absoluten Größe abhängig ist. Bezeichnen wir das Verhältnis der linearen Abmessungen zweier betrachteter Flugzeuge mit $\varkappa = l_{\text{Modell}}/l_{\text{Flugzeug}}$, so ist es üblich, anzunehmen, daß sich die Gewichte wie $\varkappa^3$ verhalten. In unserem Falle ist jedoch das Gewicht des Modells so klein, daß man für G mindestens eine Änderung mit der 5. Potenz der Längenabmessungen ansetzen muß. Nimmt man an, daß die Luftkräfte in beiden Fällen vergleichbar sind, so kann man nach den Methoden der Ähnlichkeitsmechanik, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, zeigen, daß sich in unserem Falle die Leistungsbelastungen wie $\varkappa^{-3/2}$ verhalten müßten[1]). Damit kommen wir vom Modell ausgehend zu einem Flugzeug mit einer Leistungsbelastung unter 1 kg/PS; das bedeutet, daß das Modell im Verhältnis zu seinem Gewicht einen außergewöhnlich starken Motor besitzt. — Aus dieser Betrachtung geht übrigens noch hervor, daß Flugmaschinen wie Flugtiere, solange die Luft-

[1]) Nimmt man an, daß sich die Gewichte wie $\varkappa^3$ verhalten, so ändern sich die Leistungsbelastungen wie $\varkappa^{-1/2}$

kräfte vergleichbar bleiben, mit abnehmender absoluter Größe mit einem relativ zum Gewicht schwächeren Motor die gleichen Flugleistungen erzielen.

Die hier berührten Gesetze der Ähnlichkeitsmechanik werden auch in anderen Fällen gute Dienste leisten können. So ist es mit ihrer Hilfe möglich, viele aus dem Flugzeugbau bekannte Daten bei der Analyse des tierischen Fluges zu verwerten und andererseits die verschiedenen Flugtiere untereinander zu vergleichen.

Die trotz des geringen Gewichtes und der langsamen Schlagfrequenz relativ geradlinige Bewegung des Schwerpunktes läßt darauf schließen, daß die Vertikalkraft im Verlaufe einer Schwingung nur wenig schwankt. Damit kommen wir auf das schon oben berührte Problem der Funktionsteilung längs der Flügelspannweite. Schon Lilienthal[1]) hatte angenommen, daß bei den Vögeln die rumpfnahe Flügelzone vorzugsweise für einen stetigen Auftrieb und die Flügelenden für Vortrieb sorgen. Obwohl unsere Auswertungsmethode in diesem Punkte noch nicht die wünschenswerte Genauigkeit erreicht hat[2]), sehen wir in der Tat an unserem Beispiel, daß die rumpfnahe Zone bei geringer Anstellwinkelamplitude und großem mittlerem Anstellwinkel, das Flügelende umgekehrt mit großer Anstellwinkelamplitude und kleinem mittlerem Anstellwinkel arbeitet. Die Anstellwinkelverhältnisse entsprechen damit in unserem Falle qualitativ an der Flügelwurzel denen von Fig. 9e (und zwar denen der gestrichelten Kurven) und an der Flügelspitze denen von Fig. 9c. Es ergibt sich also, daß die äußere Flügelzone während des Aufschlages von oben angeströmt wird und somit zwar Vortrieb aber auch Abtrieb liefert[3]). Dieser Abtrieb wird jedoch durch einen zusätzlichen Auftrieb der rumpfnahen Zone zum Teil kompensiert. Zwischen Flügelspitze und Rumpf wird es nun einen Flügelschnitt geben, welcher gerade unter dem Anstellwinkel Null angeströmt wird (Fig. 9d); diese Stelle wandert beim Aufschlag von der Spitze her zunächst über den Flügel nach innen und dann wieder zurück. — Beim Abschlag haben wir an allen Stellen der Spannweite Auftrieb und Vortrieb; der letztere wird dabei wieder in der Hauptsache vom Flügelende erzeugt, da dieses die größte Schlagamplitude hat.

Das hier angeführte Beispiel stellt insofern einen mittleren Fall dar, als sowohl eine weitere Zunahme der beim Aufschlag negativ angeströmten Flügelpartie als auch eine Abnahme derselben bis auf Null möglich ist. Im ersten Falle nähern wir uns dem Rüttelflug, bei dessen Extremfall, dem Flug auf der Stelle, die gesamte Fläche abwechselnd positiv und negativ angestellt ist; im anderen Falle kommen wir zu einer Flugweise, wie sie wahrscheinlich von vielen Vögeln (sicher von Ringeltauben) im schnellen Horizontalflug verwirklicht wird. Endgültige Feststellungen hierüber stehen noch aus.

Die angegebenen Luftkraftbeiwerte $\bar{c}_a$, $\bar{c}_w$ und $\bar{c}_s$ sind nicht aus einer quasistationären Theorie im obigen Sinne erhalten, sondern aus den Gleichgewichtsbedingungen für den stationären Steigflug. Ist γ_0 der mittlere Bahnwinkel, so muß der mittlere Auftrieb $\bar{A}$ der Gewichtskomponente $G \cdot \cos\gamma_0$ das Gleichgewicht halten und ebenfalls der mittlere Schub $\bar{S}$ gleich den mittleren Widerstand $\bar{W}$ vermehrt um die Gewichtskomponente $G \cdot \sin\gamma_0$ sein:

$$\bar{A} = G \cdot \cos\gamma_0$$

$$\bar{S} = G \cdot \sin\gamma_0 + \bar{W}$$

In diesen Gleichungen sind G und γ_0 bekannt, außerdem auch $\bar{S}$, welches sich aus der Motorleistung N (in PS) und der mittleren Geschwindigkeit $\bar{v}_s$ des Schwerpunktes berechnen läßt.

$$\bar{S} = 75\,\eta\, N/\bar{v}_s$$

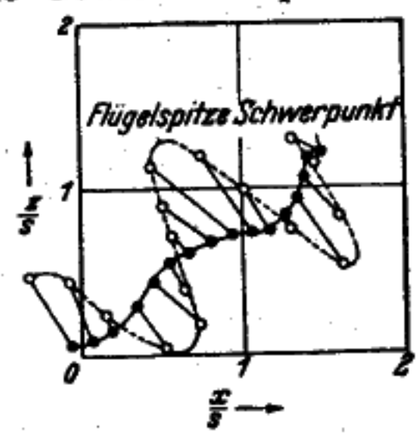

Fig. 14. Bewegung des Schwerpunktes und der Flügelspitze im Raum beim Steigflug eines anderen Flugmodells. Einzelheiten wie in Fig. 13.

Wir wollen den Wirkungsgrad η für unsere Abschätzung zu 0,5 annehmen, da darin auch die Verluste im Getriebe usw. enthalten sein müssen. Auf diese Weise erhalten wir $\bar{A}$, $\bar{W}$ und $\bar{S}$ und daraus auch ihre Beiwerte. Widerstands- und Schubbeiwert sind außerordentlich groß. Das erklärt sich u. a. aus der Steilheit der Flügelbahn (der Bahnwinkel an jeder Stelle ist bedeutend größer, als bei der quasistationären Theorie vorausgesetzt war), wodurch eine nicht geringe Komponente des Auftriebs, auf die mittlere Bahnrichtung bezogen, teils als Widerstand, teils als Schub erscheint. Es sei bemerkt, daß eine grobe Abschätzung mittels einer quasistationären Theorie zu ähnlich hohen Werten führt. Zum Vergleich zeigt Fig. 14 eine kurze Flugstrecke eines anderen Modells mit einem Steigwinkel von 40°. Die noch steilere Bahnkurve (die Flugart nähert sich schon dem Rütteln) mit einer reduzierten Frequenz $\nu = 0{,}9$ ergibt noch größere Beiwerte: $\bar{c}_a = 1{,}2$; $\bar{c}_w = 1{,}1$; $\bar{c}_s = 2{,}4$. Alle diese Beiwerte sind auf die mittlere Geschwindigkeit des Massenschwerpunktes bezogen.

VI.

An die Besprechung der Flügelbewegung selbst und ihrer Wirkung sei noch eine kurze Betrachtung

---

[1]) O. Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, 3. Aufl. München u. Berlin 1939.

[2]) Da bei unseren bisherigen Modellen die mechanisch vorgegebene Bewegung des Flügels durch dessen Elastizität noch modifiziert wird, ist eine völlig genaue Feststellung des Bewegungsablaufs nur mit Hilfe sehr scharfer Zeitlupenfilme möglich.

[3]) Es sei hierbei nochmals darauf hingewiesen, daß die Fig. 9 nur für den theoretisch behandelten Fall der an jeder Stelle der Spannweite die gleiche Bewegung ausführenden Fläche gilt. Für eine quantitative Aussage müßte man in unserem Falle die gegenseitige Beeinflussung der (verschiedene Bewegungen ausführenden) einzelnen Flügelschnitte mit berücksichtigen.

über die Stabilisierung des ganzen Flugapparates angeschlossen. Da der Flügel, wie wir sahen, eine genau dosierte Drehung um seine Längsachse auszuführen hat, ergibt sich vor allem die Frage, wodurch die hierbei auftretenden Drehmomente um die Querachse des Flugtieres bzw. Flugmodells kompensiert werden. Die Beobachtung der Natur lehrt, daß bei den größeren oder wenigstens langsam schlagenden Flugtieren im wesentlichen zwei Möglichkeiten verwirklicht sind. Entweder ist eine besondere, von den Flügeln getrennte Fläche, der Schwanz der Vögel oder die Hautplatte gewisser Flugsaurier mit langem Eidechsenschwanz, am Hinterende angebracht (Fig. 15a—c); oder aber die hintere Mittelzone der Flügelfläche selbst übernimmt die stabilisierende Funktion, wie es die Fledermäuse, ferner ein anderer Flugsaueriertyp sowie die in dieser Hinsicht fledermausartig fliegenden größeren Tagfalter zeigen (Fig. 15d—f). Beide Arten der Stabilisierung sind auch im Flugmodell darstellbar. Unsere bisherigen Versuche in dieser Richtung ergaben, daß beim zweiten Typ die betreffende hintere Flügelzone die Auf- und Abbewegung der Flügel wohl mitmachen kann, sich aber an der Drehung um die Flügellängsachse naturgemäß nicht beteiligen darf (vgl. Fig. 12, wo man bei den Aufnahmen von der Seite diese Bewegung des „Schwanz"teiles der Flügel erkennen kann). Weiterhin ergab sich, daß beim Flugmodell die Größe dieses Flächenteils ein gewisses Minimum nicht unterschreiten darf, ohne die Stabilität um die Querachse aufzuheben (beim Nur-Flügelmodell von Fig. 12 z. B. war nach Verkleinern dieser hinteren Flügelregion um ein Drittel ein stabiler Flug nicht mehr möglich). Bei den Flugtieren kann im Gegensatz dazu diese Zone weitgehend reduziert sein (viele Fledermäuse und vermutlich auch Flugsaurier); den Vögeln ist selbst bei völligem Verlust der Schwanzfläche ein Fliegen noch möglich. An dieser Stelle zeigt sich die klare Überlegenheit der Tiere, die auch eine labile Fluglage mittels ständiger reflektorischer Korrekturen meistern. Der Mittel, die sie hierzu anwenden können, ließen sich verschiedene nennen; wie sie es tatsächlich tun, wird sich erst mit Hilfe guter Filmaufnahmen genauer feststellen lassen[1]).

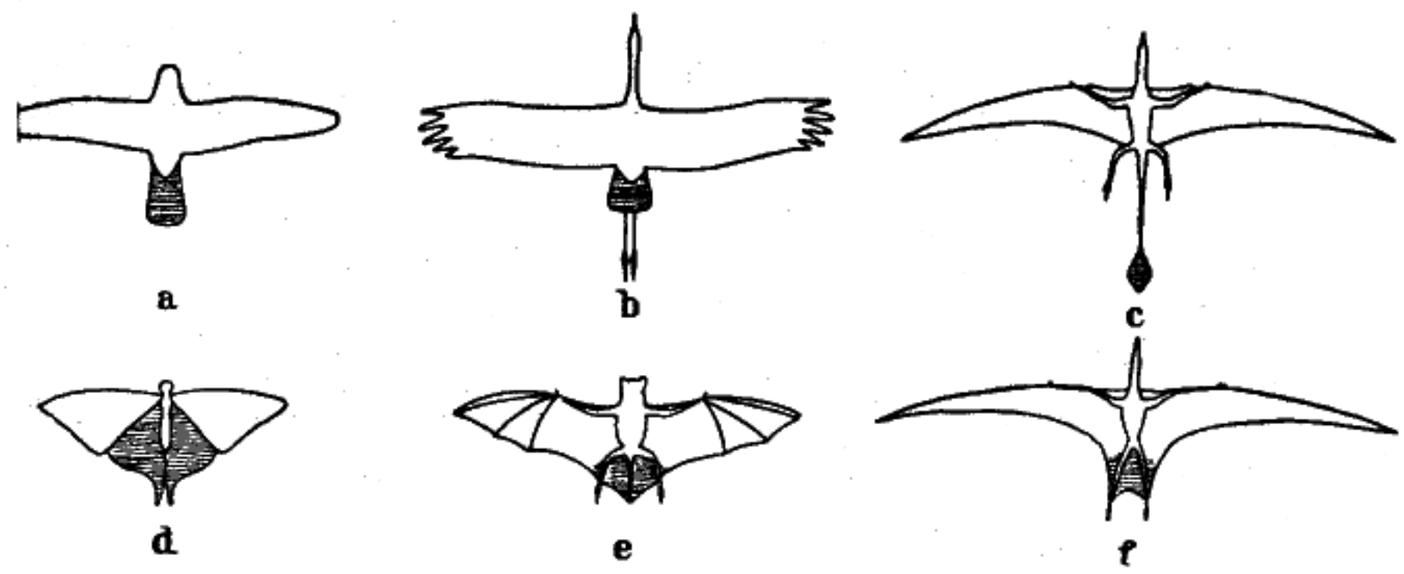

Fig. 15. Lage der Stabilisierungsfläche (schattiert) bei verschiedenen Flugtieren; *a*) und *b*) Vögel, *c*) Flugsaurier vom Typ Ramphorhynchus, *d*) Tagfalter, *e*) Fledermaus, *f*) Flugsaurier vom Typ Pteranodon.

Am Drehmomentenausgleich um die Querachse kann weiterhin auch die Masse des Körpers in verschiedenem Maße teilhaben. Eine gewisse, wenn auch untergeordnete Rolle mag bei Vögeln mit langem Hals und langen Beinen das Ausstrecken derselben nach vorne und hinten, also weit weg vom Drehpunkt, spielen (Fig. 15b). In Flugzuständen, wo mangels ausreichender Anströmung die Schwanzfläche kaum eine Wirkung entfalten kann, wie beim Flug auf der Stelle, wird (mindestens bei langsam schlagenden Formen) der Schwerpunkt möglichst tief gelagert (Fig. 4b). Bei sehr vielen Insekten, die sich auf dieses Fliegen auf der Stelle spezialisiert haben, fehlt überhaupt eine besondere Stabilisierungsfläche.

Besondere Beachtung verdient in diesem Zusammenhang der Flug der Libellen, die bekanntlich

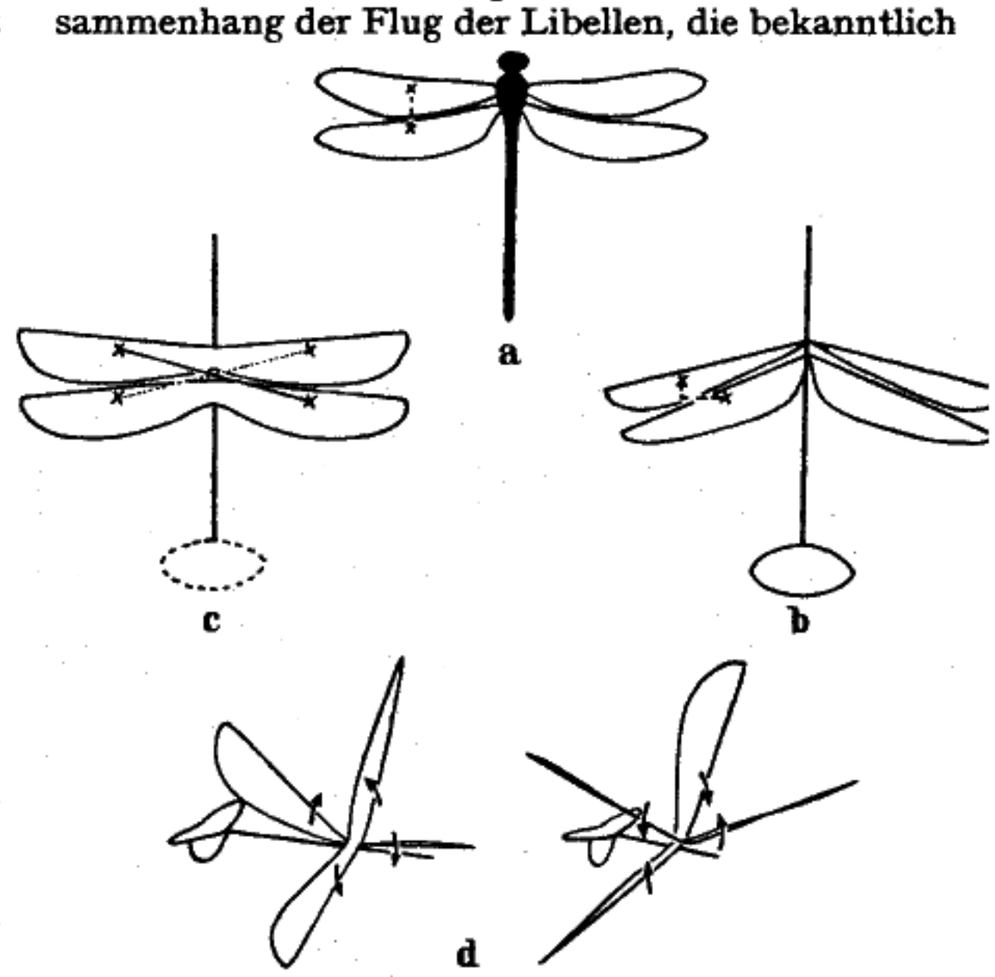

Fig. 16. *a*) Habitus einer Libelle; *b*) und *c*) Flugmodelle nach dem Libellenflugprinzip. In *b*) werden die Flügelpaare wie bei der Libelle alternierend, in *c*) über Kreuz alternierend bewegt. Die Kreuze deuten die jeweilige Lage der Druckpunkte an. *d*) Skizzen zweier typischer Flügelstellungen des Modells *c*) (nach Filmaufnahmen); die kleinen Pfeile bezeichnen die jeweilige Schlagrichtung der Flügel.

[1]) K. LORENZ beschreibt, daß ein schwanzloser Bussard deutlich behindert (unter stabilisierendem Vor- und Zurückbewegen der Flügel), schwanzlose Krähen dagegen ohne sichtbare Beeinträchtigung fliegen konnten.

die Fähigkeit besitzen, ihre beiden Flügelpaare gegensinnig, d. h. im zeitlichen Phasenabstand von einer halben Schwingung, zu bewegen. Der Vorteil einer solchen Flugweise liegt darin, daß sich die Unterschiede in der Wirkung von Auf- und Abschlag ständig gegenseitig kompensieren, da beide Bewegungen jeweils gleichzeitig von je einem Flügelpaar ausgeführt werden. Der Massenschwerpunkt kann daher, im Gegensatz zur Flugweise der Vögel, Fledermäuse usw., mit nahezu gleichbleibender Geschwindigkeit eine geradlinige Bahn zurücklegen. Der Nachteil besteht im Auftreten eines erheblichen Drehmomentes um die Querachse infolge des Abstandes in Längsachsenrichtung, den die Druckpunkte[1]) beider Flügelpaare besitzen (vgl. Fig. 16a). Diesen Schaden gleichen die Libellen erstens durch eine sehr starke Längsstreckung der Körpermasse aus — der typische dünne, lange Libellenkörper ist ohne Zweifel ein Korrelat zur Flugweise — und dann, wie es scheint, durch Einhalten einer relativ hohen Schlagfrequenz; bei kleineren benötigten Luftkräften wird offenbar vorzugsweise die Amplitude und nicht, wie sonst üblich, die Frequenz herabgesetzt.

Das Flugverfahren der Libellen ist am Flugmodell wesentlich einfacher als das der Vögel darzustellen. Die relativ langsame Schlagfrequenz der bisher von uns gebauten Modelle (Spannweite nicht unter 30 cm) verlangt freilich als zusätzlichen Momentenausgleich die Anbringung einer Schwanzfläche. Man kann dieses Drehmoment stark verringern, indem man die Flügel schräg nach hinten verlaufen läßt (Fig. 16b), was eine Annäherung der Druckpunkte in Längsachsenrichtung ermöglicht; beseitigt wird es, wenn man die Flügel über Kreuz miteinander schlagen läßt (Fig. 16c, d). In diesem Falle ist ein stabiler Flug (bei nicht zu geringer Schlagfrequenz) auch ohne jede weitere Fläche, wie bei der Libelle selbst, durchaus möglich. Bei größerer Bauweise macht allerdings ein gewisses Moment um die Hochachse die Anbringung mindestens einer vertikalen Stabilisierungsfläche notwendig, während eine weitere horizontale die Flugsicherheit erhöht[2]).

Diese kurzen Ausführungen über das bisher im Schwingenmodellbau Erreichte sollten nur zeigen, daß ein sicherer Ausgangspunkt für exakte Messungen geschaffen ist; eine gründliche Weiterentwicklung der Modelle für die besonderen Meßzwecke ist jedoch erforderlich. In Verbindung mit einer noch auszubauenden Theorie würde es dann möglich sein, den Einfluß der Einzelheiten der Flügelbewegung, die Rolle der absoluten Größe, der Flügelform und der Flächenbelastung und, damit zusammenhängend, der reduzierten Frequenz und der REYNOLDSschen Zahl, den Einfluß der Kraftverteilung, die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Flächen (Vorflügel, Spaltflügel, Doppelflügel der Libellen und Heuschrecken usw.), die verschiedenen Möglichkeiten der Steuerung und Stabilisierung und vieles weitere festzustellen. Damit wäre auch für eine künftige Entwicklung der menschlichen Flugtechnik in dieser Richtung — eine Möglichkeit, die sich heute ebensowenig bestreiten wie beweisen läßt — die nötige exakte Basis gegeben.

Enges Zusammenwirken biologischer und physiologischer, physikalisch-technischer und aerodynamischer Methoden und Anschauungsweisen, wozu dieser Aufsatz eine Anregung geben wollte, wird hoffentlich bald dazu führen, daß aus diesem Gebiet, das nach so verschiedenen Seiten Interessantes bietet, und das bisher — sei es wegen seiner Schwierigkeiten, sei es aus Widerspruch gegen allzu unkritisch-optimistische Vorstellungen oder aus dem Gefühl einer längst über die Natur erreichten Überlegenheit heraus — so sehr vernachlässigt wurde, ein neuer blütenreicher Zweig der deutschen Wissenschaft erwächst: die *Flugbiophysik*.

[1]) Unter Druckpunkt ist hier der Schwerpunkt der Auftriebsverteilung des rechten und linken Flügels getrennt verstanden.

[2]) Ein Flugmodell dieses Typs von 0,5 m Spannweite führte beim obenerwähnten Breslauer Wettbewerb Steigflüge von 6—7 m Startüberhöhung und bis zu 44 sec Dauer aus.

Kurze Originalmitteilungen.

Für die kurzen Originalmitteilungen ist ausschließlich der Verfasser verantwortlich.

Versuche über Impfung von Kaninchen gegen aviäre Tuberkulose.

Bereits KOCH und später v. BEHRING haben beobachtet, daß die immunisierenden Eigenschaften abgetöteter Tuberkelbakterien sich im nichtwasserlöslichen Anteile vorfinden (KOCHS T.R. und v. BEHRINGS T.C.). Beide Forscher waren bestrebt, ein leichter resorbierbares Vaccin von geringerer lokaler Reizwirkung als der unbehandelter Tuberkelbakterien darzustellen. Man hat gefunden, daß auch anderen Fraktionen von Tuberkelbakterien ein gewisses Immunisierungsvermögen eigen ist. In erster Linie gilt dies von den Lipoidfraktionen, doch können auch entfettete Bakterien als Vaccine wirken. Eine große Anzahl antigene Substanzen ist aus den Tuberkelbakterien isoliert worden; die entsprechenden Antikörper scheinen jedoch für die Immunität keinerlei Bedeutung zu haben. Offensichtlich kennt man keinen unzweideutigen Zusammenhang zwischen Immunisierungsvermögen und chemischer Fraktion oder Antigenstruktur.

Die Versuche, über welche hier berichtet werden soll, gingen aus von der Arbeitshypothese, daß die Tuberkelbakterien als komplexe Antigene Substanzen enthalten können, welche mit den für die Immunisierung wichtigen Antigenen in Konkurrenz zu treten oder sie zu maskieren vermögen. Es läßt sich dann die Möglichkeit denken, durch Fraktionierung von Tuberkelbakterien eine Fraktion zu gewinnen, in welcher das immunisierende Prinzip höhere Konzentration oder bessere Wirkung hat als in den Tuberkelbakterien.

Kaninchen wurden während eines Monats mit 50 auf wiederholte kleine Gaben verteilten Milligramm verschiedener Fraktionen subcutan geimpft. Nach 6wöchiger Erholungspause erhielten die Tiere eine intravenöse Injektion von virulenten Vogeltuberkelbakterien in einer Dosis, welche normale Kaninchen innerhalb etwa 30 Tagen tötete. Als Vaccinstamm wurde ein avirulenter aviärer Stamm Bang verwendet, welcher seit einer Reihe von Jahren in Statens Veterinärbakteriologiska Laboratorium zu Stockholm zur Gewinnung von Tuberkulin in Gebrauch ist. Ein Teil dieser