

Sonderdruck aus

„BIOLOGISCHES ZENTRALBLATT“

Band 82 (1963), Heft 4

Herausgabe und Redaktion: H. Autrum, R. Harder, A. Kühn, H. Stubbe

VEB GEORG THIEME, LEIPZIG

Flug und Flügel von Star und Amsel

1. Teil: Biophysik des Fluges

Von HANS OEHME

Flug und Flügel von Star und Amsel

Ein Beitrag zur Biophysik des Vogelfluges
und zur vergleichenden Morphologie der Flugorgane

1. Teil: Biophysik des Fluges

Von HANS OEHME

Mit 27 Abbildungen

Einleitung

Der Vogelflug „als Grundlage der Fliegekunst“ findet kaum noch das Interesse der Flugtechnik, die ja über die grundlegenden Erkenntnisse LILIENTHALS (1910) längst hinausgewachsen ist. Der Vogelflug ist es aber immer noch wert, als biophysikalische Erscheinung genauer untersucht zu werden. Vor allem muß man versuchen, die von der Technik bereitgestellten aerodynamischen Erkenntnisse zu seiner Analyse anzuwenden.

Ein Überblick findet sich bei STOLPE und ZIMMER (1939a). Grundlegende experimentelle Untersuchungen zum Problem des Schwingenfluges verdanken wir VON HOLST (1943a); der gleiche Forscher hat zusammen mit D. KÜCHEMANN (1941) die theoretischen Grundlagen des Schwingenfluges dargestellt. VON HOLST hat einen weiteren Weg gezeigt: den Bau von „künstlichen Vögeln“, Vollschwingenflugmodellen, deren Flügelbewegungen denen der Flügeltiere weitgehend gleichen (VON HOLST und KÜCHEMANN 1941 und VON HOLST 1943b). Aber dieser Weg ist nicht weiter beschränkt worden, besonders fehlen Flugmodelle, die im Gewicht und in der Flächenbelastung mit den Vögeln übereinstimmen.

Abhandlungen über den Vogelflug geben gewöhnlich einen Überblick über die Strömungsverhältnisse am Flügel, aber zum Teil werden als Beispiel dicke Flugzeugprofile genommen, und der Flug der Vögel selbst wird nur qualitativ beschrieben (GLADKOW 1953, JACOBS 1954, OEHMICHEN 1950, STEINBACHER 1960, STORER 1948). Die Flugbewegung ist bei verschiedenen Vögeln untersucht worden (BROWN 1948, 1951, 1953, DEMOLL 1930, GREENEWALT 1960c, MAREY 1890, STOLPE und ZIMMER 1939b, STORER 1948, ZIMMER 1943), und der Einsatz leistungsfähiger Zeitlupenkameras hat in neuerer Zeit einen genaueren Einblick in die Flügelbewegung auch kleiner Vögel ermöglicht.

Den Beziehungen zwischen Flugweise und der Anatomie des Vogels ist besonders BÖKER (1927, 1931, 1935) nachgegangen, aber er berücksichtigte nur äußere Erscheinungsformen des Vogelfluges. Die genaueste Analyse der Wechselbeziehung zwischen Bau und Funktion der Flugorgane des Vogels verdanken wir LORENZ (1933), wenn auch die physikalische Deutung des Flugvorganges zum Teil unrichtig ist.

Den Flug kleiner Vögel habe ich schon vergleichend untersucht (OEHME 1959); die nicht sehr leistungsfähige Apparatur erlaubte aber keine quantitative Berechnung des Kraftfluges. Das soll jetzt an zwei häufigen heimischen Vögeln (*Sturnus vulgaris* und *Turdus merula*) versucht werden. Zu den flugphysikalischen Untersuchungen treten als nötige Ergänzung anatomische Befunde an den Flugorganen.

Ich habe an dieser Stelle meiner technischen Assistentin, Frau HELGA SCHEEL, für die sorgfältige Arbeit bei der Herstellung und Auswertung der Präparate und für die Unterstützung bei den umfangreichen und oft schwierigen photographischen Arbeiten zu danken. Besonderer Dank gebührt auch dem wissenschaftlichen Graphiker, Herrn REINER ZIEGER, der mir bei der Auswertung der Filme unermüdlich geholfen hat. Er fertigte sämtliche in der Arbeit enthaltenen Zeichnungen an.

1. Teil: Biophysik des Fluges

Für die Analyse des Kraftfluges entstehen zwei Hauptaufgaben:

Die Feststellung der Ausgangswerte: Fluggeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit des Flügels, Frequenz des Flügelschlages, Schlagwinkel, Flügellänge, Flügelstreckung, Profilbeiwerte.

Die Berechnung der Luftkräfte aus den Ausgangswerten und die Ermittlung charakteristischer Größen für verschiedene Flugzustände.

Methoden

Die Flugbewegung wurde durch Schmalfilmaufnahmen registriert. Zum Filmen der freifliegenden Vögel bedurfte es einer leichten und präzise arbeitenden Kamera. Diese Voraussetzungen erfüllte die WEBO M Reflex 16 (Pathé), die bei einer Bildfrequenz von 80 B/sec eine ausreichende Zeitdehnung besitzt. Mit einem Teleobjektiv von 150 mm Brennweite ließen sich verwertbare Aufnahmen bis zu einer Entfernung von 60 m anfertigen. Das einzelne Bild wurde mit 1/800 bis 1/1100 sec belichtet, wodurch Bewegungsunschärfen weitgehend ausgeschaltet wurden. Als Filmmaterial bewährte sich der Zeitlupenfilm (Negativfilm) des VEB Filmfabrik Agfa Wolfen (Empfindlichkeit 25°/10 DIN). Aufnahmen von unten oder schräg von vorn oder hinten geben einen allgemeinen Überblick über die Flugbewegung (Abb. 1), die Bahnkurven der Flügelspitze, der Schlagwinkel und die Winkelgeschwindigkeit des Flügels lassen sich an Aufnahmen von der Seite (Abb. 2) und genau von hinten oder von vorn (Abb. 3) ermitteln. Für die Auswertung wurden die entwickelten Negativfilme im Leseapparat durchgesehen, die brauchbaren Abschnitte markiert und von ihnen Vergrößerungen hergestellt. Es wurden rund 200 verschiedene Flugszenen gefilmt, davon wurden für die späteren Berechnungen 38 Szenen vom Star und 13 von der Amsel verwertet. Die Fluggeschwindigkeit wurde bei Windstille bestimmt. Entweder wurde mit der Stoppuhr die zum Durchfliegen einer bestimmten Strecke benötigte Zeit ermittelt, oder der Abstand zwischen bestimmten Geländemarken wurde nachträglich ausgemessen, wenn der Vogel solche markanten Punkte in geringem Abstand überflogen hatte und das im

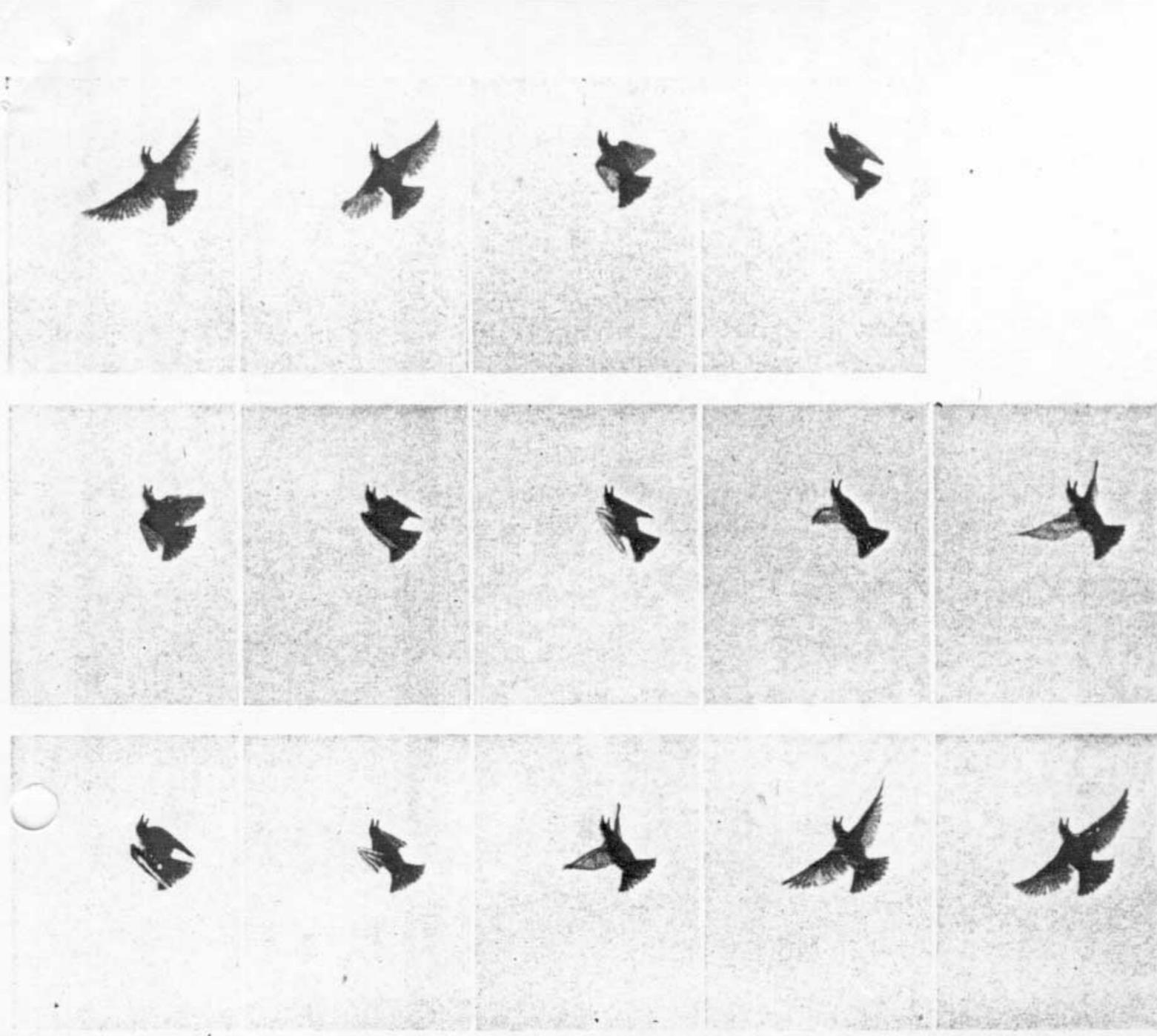
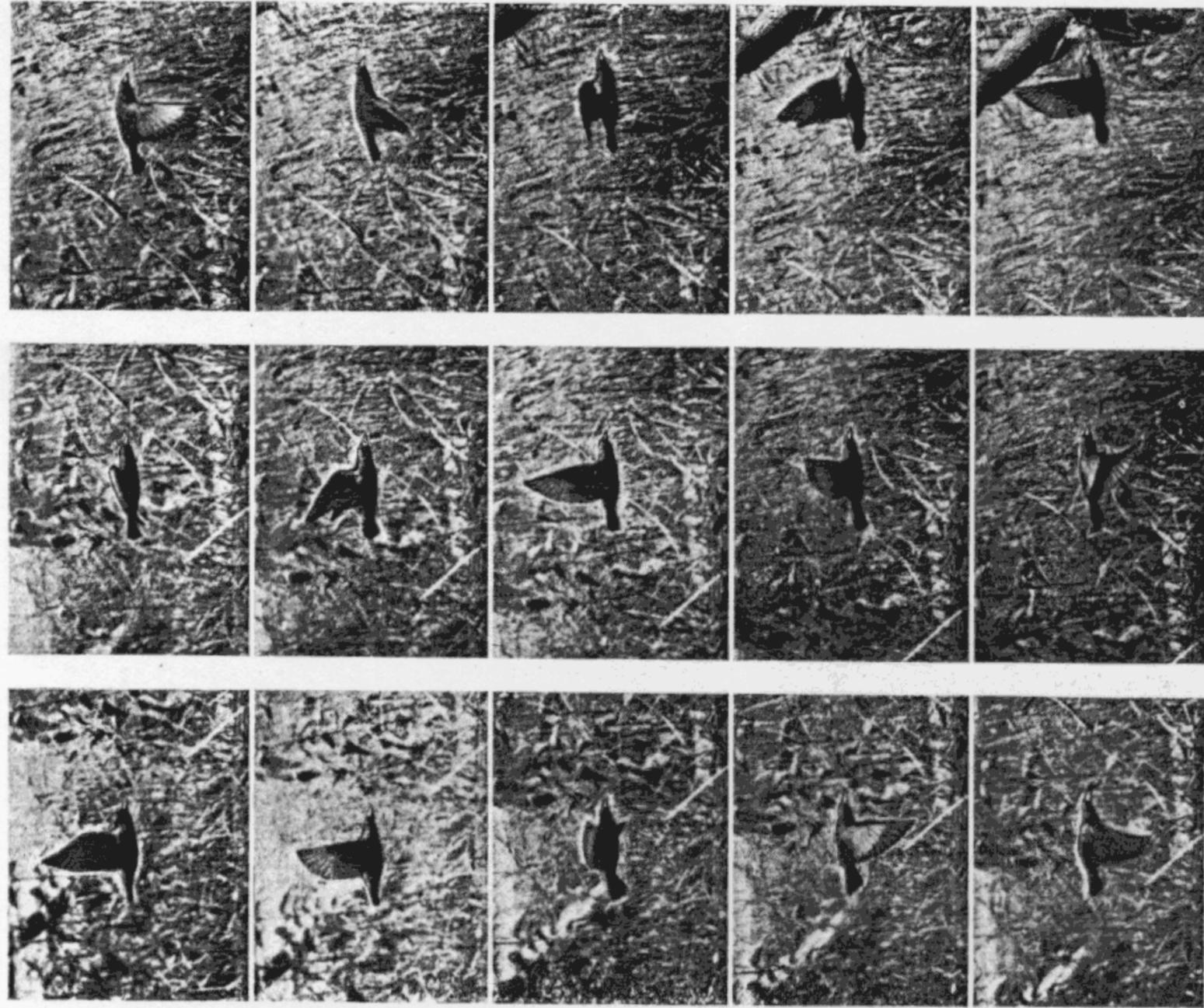
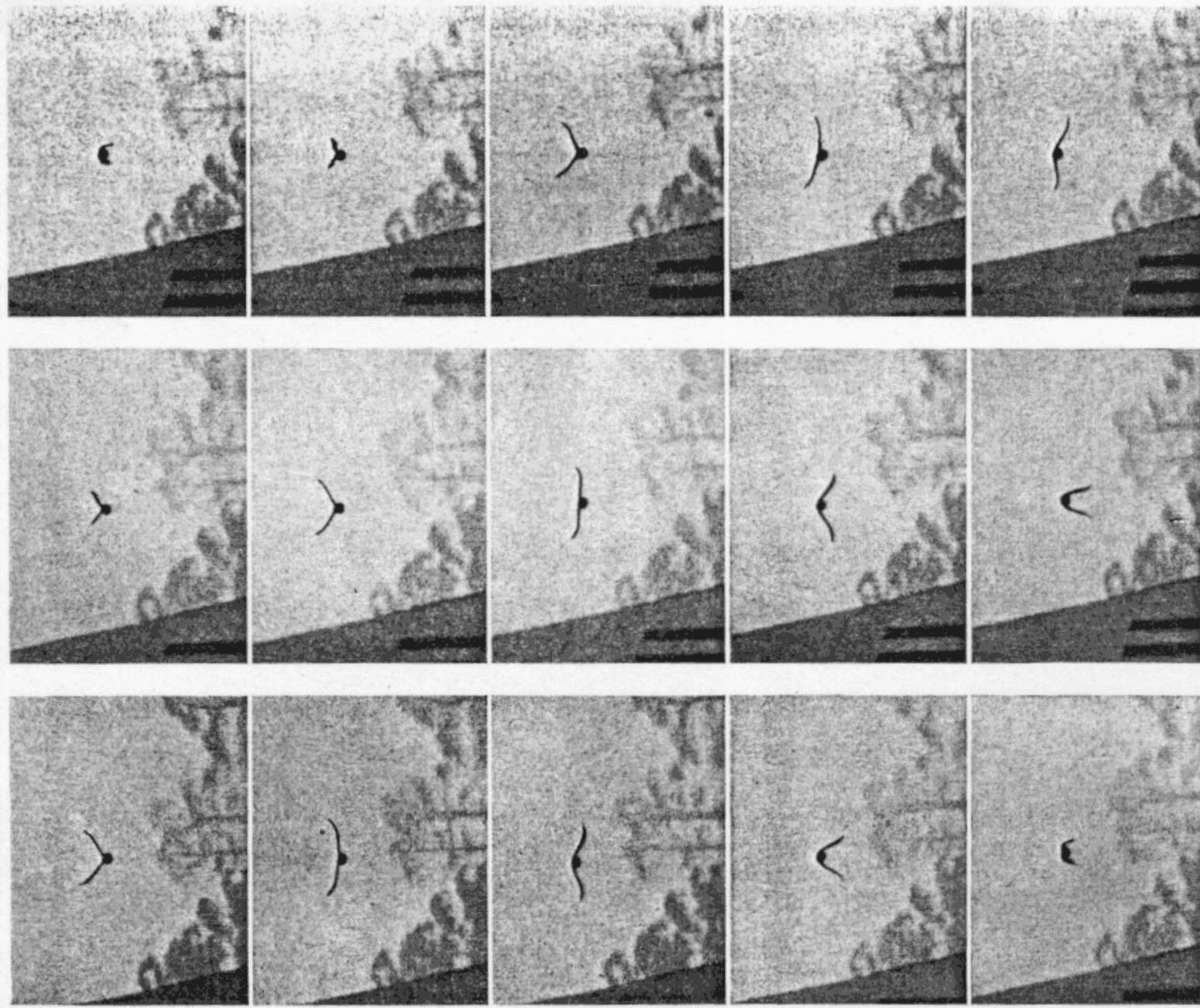


Abb. 1. *Sturnus vulgaris*, gebremster Flug (Bildabstand 1/80 sec, Reihenfolge der Bilder von oben nach unten. Das gleiche gilt für die Abb. 2 und 3)

Film abgebildet war. Das letztere Verfahren wurde vor allem bei der Untersuchung des Abfluges und des gebremsten Fluges verwendet. Für die Freilandarbeiten bot das weitläufige Gelände des Berliner Tierparks mit starken Star- und Amselpopulationen gute Voraussetzungen.

Abb. 2. *Sturnus vulgaris*, waagerechter Start

Gewicht, Flügelänge, Flügelumriß und Flügelgröße wurden an frischtoten Tieren bestimmt, das Gewicht allein auch an gefangenen Vögeln, die wieder freigelassen wurden. Zur Flächenbestimmung wurde der Vogel auf einer Art großem Insektenspannbrett (Seitenbretter waagrecht) befestigt, die Flügel entfaltet und mit Nadeln fixiert, der Vogel schließlich im Reproduktionsstativ zusammen mit einem Maßstab

Abb. 3. *Turdus merula*, Streckenflug

genau von oben photographiert. Die Flächen wurden an Kopien in natürlicher Größe ausplanimetriert. Die Breitung des Flügels wurde nach Photographien vorgenommen und bei der maximalen Streckung des Flügels außerdem darauf geachtet, daß die normale Deckung der Schwungfedern eingehalten wurde.

Zur Bestimmung der Flügelprofile wurden die Flügel von frischtoten Vögeln im

Schultergelenk herausgelöst und mit der Oberseite nach unten auf einem Brettchen mit Nadeln so befestigt, daß die natürliche Lage der Federn erhalten blieb. Alles wurde in Paraffin eingeschmolzen. Nach dem Erkalten wurden die Blöcke an den vorher gekennzeichneten Stellen zersägt. Nach Glättung der Schnittflächen erfolgte die Auswertung über Photographien.

Diese Ausgangswerte zur Flugberechnung sind mit Unsicherheiten behaftet. So ist es nicht möglich, denselben Vogel zur gleichen Zeit von der Seite und von hinten zu filmen, und nicht immer läßt sich die Geschwindigkeit zusammen mit der Aufnahme messen. Es konnten also nur Durchschnittswerte aus mehreren Filmszenen vom gleichen Flugzustand zum Ziel führen, und für die Zuordnung bestimmter Geschwindigkeit zu bestimmten Formen der Flugbewegung muß auch die Erfahrung des Beobachters herangezogen werden. Immerhin gewinnt man bald einen Blick dafür, ob z. B. ein Star im schnellen Streckenflug vorbeizieht oder ob er sich während der Fütterungsflüge „Zeit nimmt“. Bestimmt man nun für den ersten Fall mehrfach Geschwindigkeiten zwischen 63 und 68 km/h, für den zweiten zwischen 48 und 54 km/h, so kann man die jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeiten wohl verwerten. Auch die an mehreren Vögeln gewonnenen Maße können natürlich nur als Durchschnittswerte verwendet werden und müssen dann für „die Amsel“ oder „den Star“ schlechthin gelten.

Flugbewegung

In verschiedenen Flugzuständen verläuft bei beiden Arten die Bewegung der Flügel ziemlich ähnlich (Abb. 4-8). Nur der Abschlager wird zur Erzeugung der Luftkräfte verwendet. Im Aufschlag faltet der Vogel den Flügel zusammen und führt ihn nahe am Rumpf vorbei nach oben zum Beginn des nächsten Abschlages. „Rütteln“ mit luftkrafterzeugendem Aufschlag, bei dem der Flügel mit „verkehrtem“ Profil angeblasen wird, kommt auch beim Start oder bei stark gebremstem Flug nicht vor. Die gleiche Bewegungsform wie bei Star und Amsel tritt bei anderen kleinen Vögeln auf (ZIMMER 1943, OEHME 1959). Abbildung 9 zeigt die zeitliche Folge der Flügelschläge. Regelmäßig ist die Schlagfolge bei beiden Arten während des Starts: Ab- und Aufschlag dauern die gleiche Zeit, Ab- und Aufschlag gehen ohne Pause ineinander über. Der Star schlägt schneller (≈ 14 Flügelschläge pro Sekunde) als die Amsel (≈ 12 Flügelschläge pro Sekunde). Das gleiche Bild zeigt der Star beim schnellen Streckenflug und beim Flug mit Höchstgeschwindigkeit, nur ist die Schlagfrequenz etwas geringer (13 bis 11 Flügelschläge pro Sekunde), und der Aufschlag währt länger als der Abschlager. Häufig fliegt der Star aber auch mit geringerer Geschwindigkeit, und dabei ist die Schlagfolge unregelmäßig: der Aufschlag wird unterbrochen. Das gleiche Bild zeigt die Amsel beim Streckenflug. Wir finden hier das sogenannte „Anhalten“, das ZIMMER (1943) ausführlich erörtert hat und was bei vielen kleinen Sperlingsvögeln zur normalen Flugweise gehört. Zum Unterschied von Sperlingen, Meisen, Finken, Rotschwänen etc. wird dieser Flug bei Amsel und Star aber nicht zum ausgeprägten Wellen- oder Bolzenflug, da die Anhaltephasen relativ kürzer sind. Ein weiterer Unterschied zwischen den genannten kleinen Sperlingsvögeln und den hier behandelten beiden Arten besteht darin, daß bei jenen die Antriebsphasen mit mehreren normalen

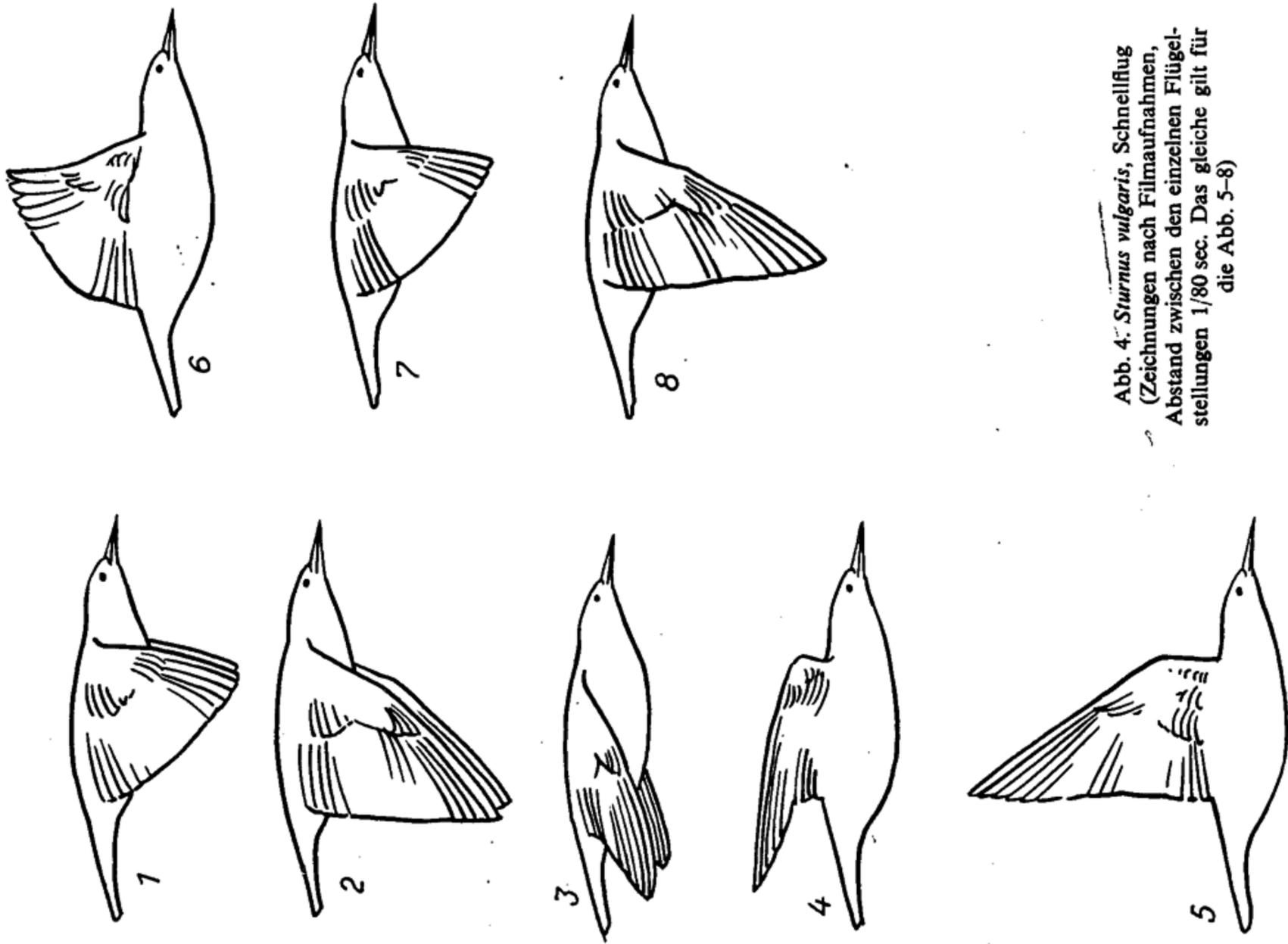


Abb. 4: *Sturnus vulgaris*, Schnellflug
(Zeichnungen nach Filmaufnahmen,
Abstand zwischen den einzelnen Flügel-
stellungen 1/80 sec. Das gleiche gilt für
die Abb. 5-8)

Flügelschlägen von längeren Pausen unterbrochen werden, während bei diesen das gesamte Schlagmuster durch die in die meisten Aufschläge eingeschalteten verschiedenen Anhaltephasen einen regellosen Charakter erhält.

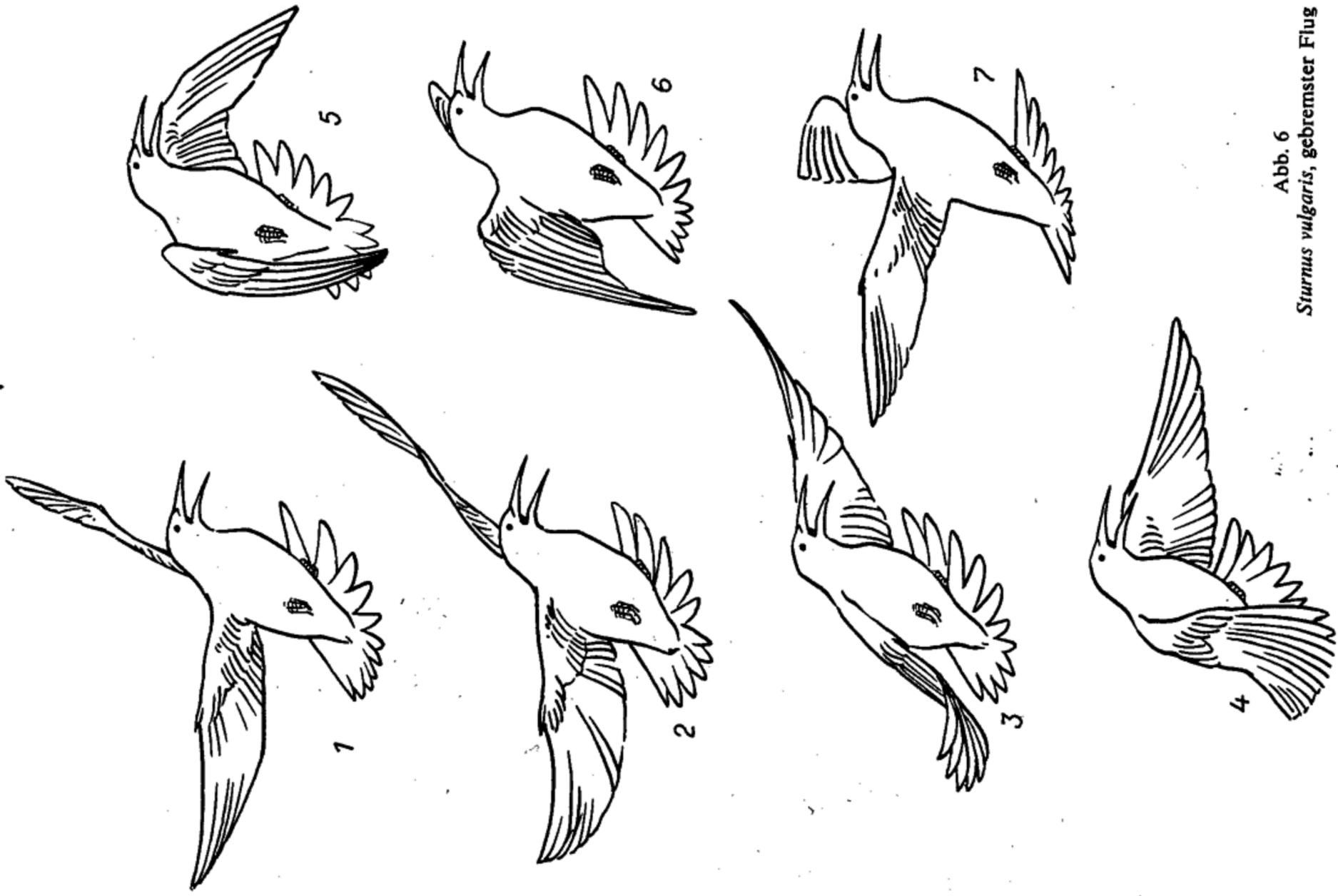


Abb. 6
Sturnus vulgaris, gebremster Flug

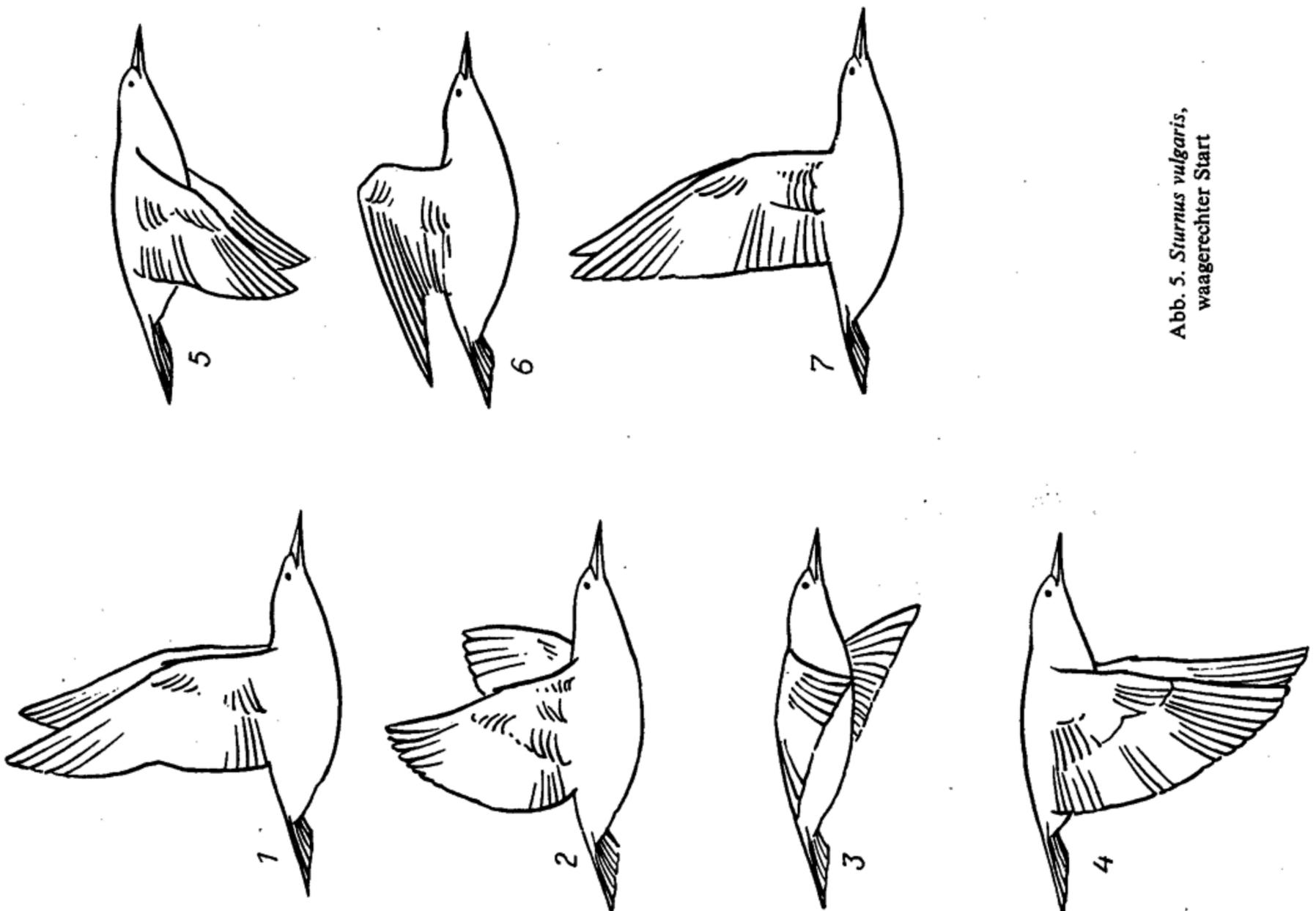


Abb. 5. *Sturnus vulgaris*,
waagerechter Start

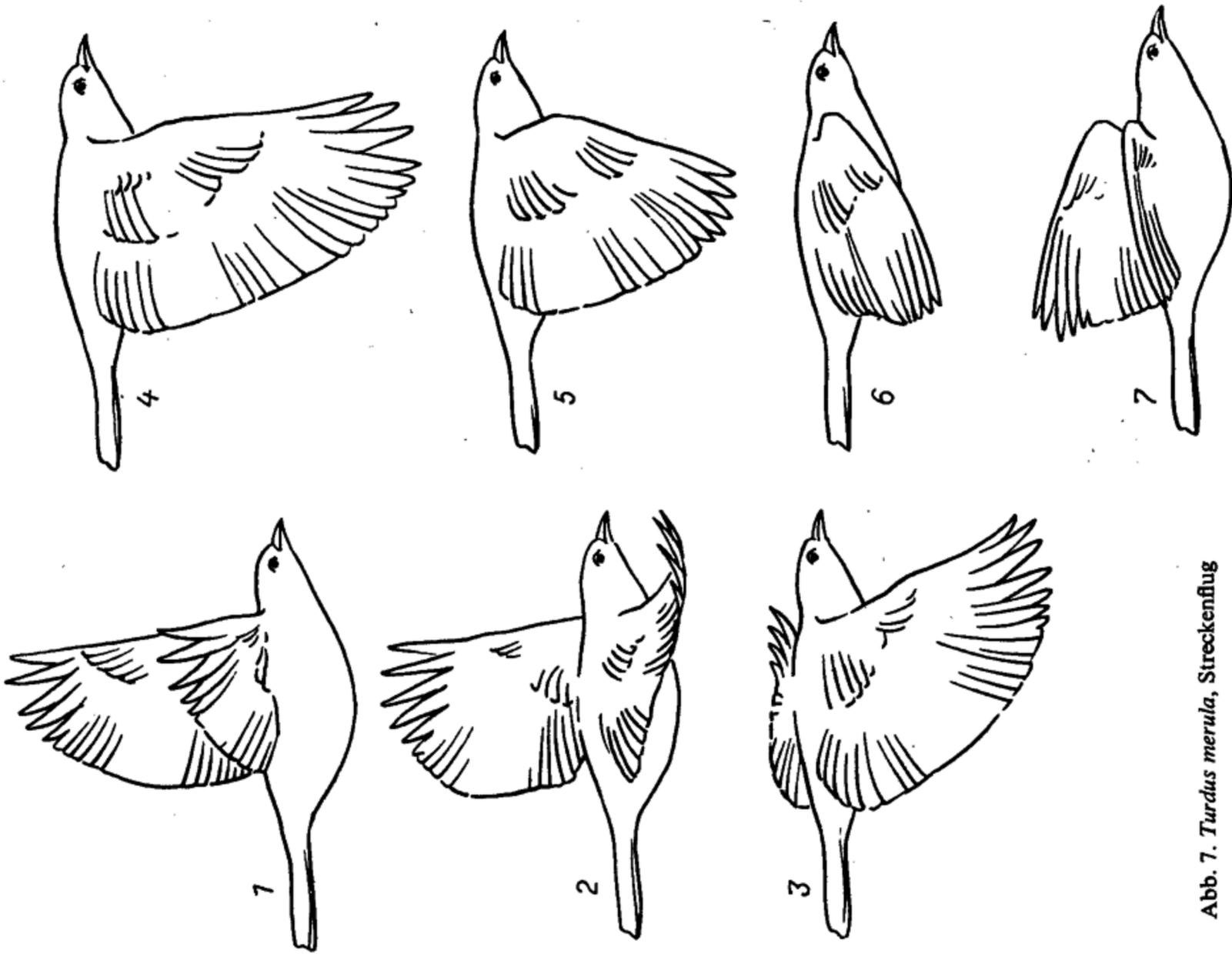


Abb. 7. *Turdus merula*, Streckenflug

GREENEWALT (1960a u. b) hat auf Grund seiner Studien an Kolibris eine Theorie entwickelt, die den Vogelflügel als mechanischen Oszillator behandelt. Er kommt zu dem Schluß, daß für jede Art eine bestimmte Schlagfrequenz besteht, die unabhängig vom Flugzustand eingehalten wird. Nur die Schlagamplitude soll sich entsprechend

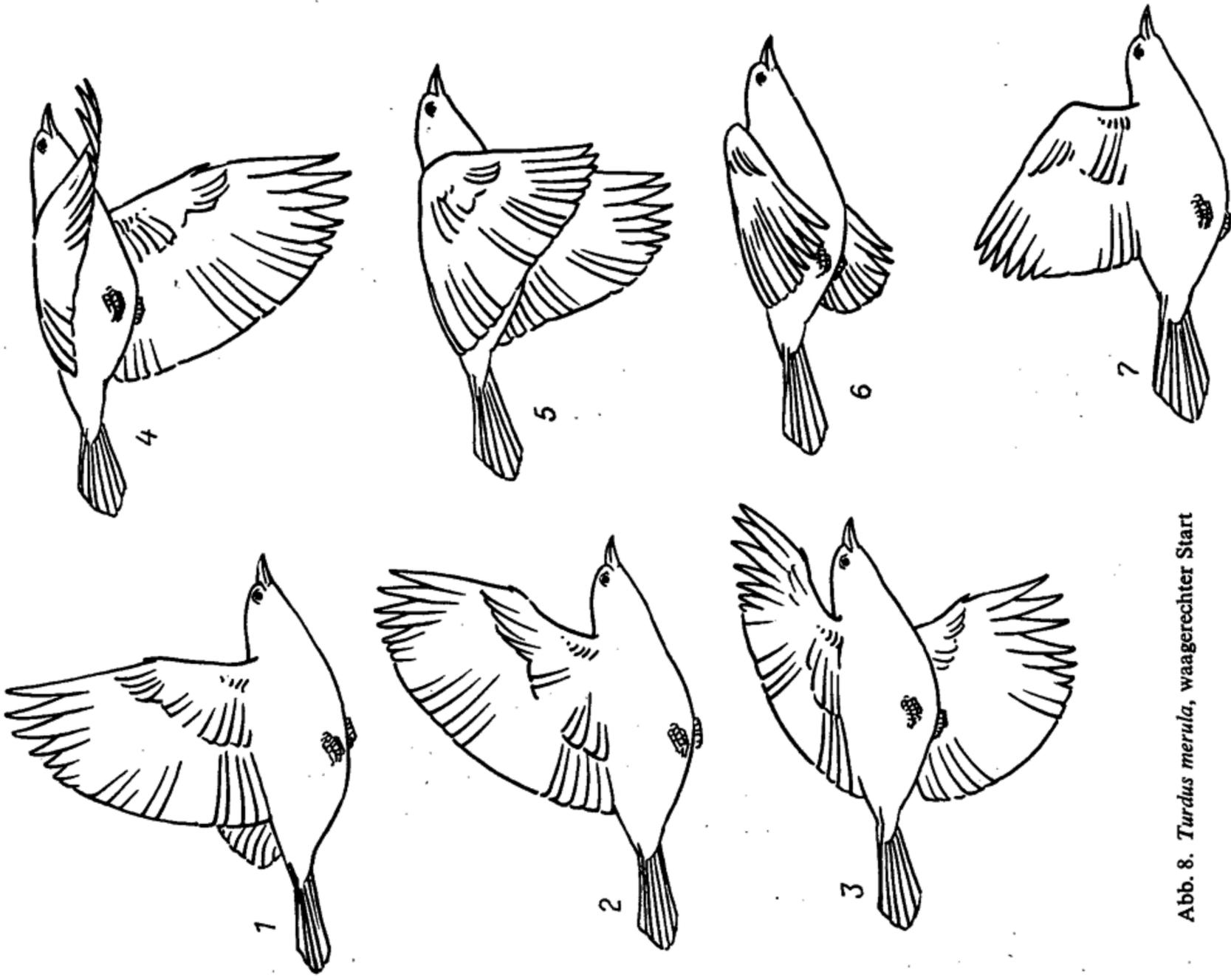


Abb. 8. *Turdus merula*, waagerechter Start

ändern. Auch wenn man diese Meinung so deutet, daß jede Art eine bevorzugte Schlagfrequenz hat, bei der die Flügelbewegung mit dem kleinsten Energieaufwand zu bewerkstelligen ist, lassen sich der Streckenflug der Amsel und der langsamere Flug des Stars nicht so erklären. Die fast die gesamte Flugarbeit beanspruchenden

Abschläge folgen ziemlich unregelmäßig; die Oszillator-Theorie setzt aber voraus, daß mindestens mehrere Flügelschläge in gleichem zeitlichem Rhythmus hintereinander ablaufen. Wahrscheinlich ist das Oszillatorprinzip bei Kolibris und Insekten gültig, bei anderen Vögeln wird es nur bedingt zutreffen (z. B. beim Star¹⁾ im Schnellflug, wo man eine nahezu regelmäßige Flügelschwingung mit $n = 11$ bis 13 sec^{-1} findet) oder überhaupt nicht anzuwenden sein wie bei der Amsel.

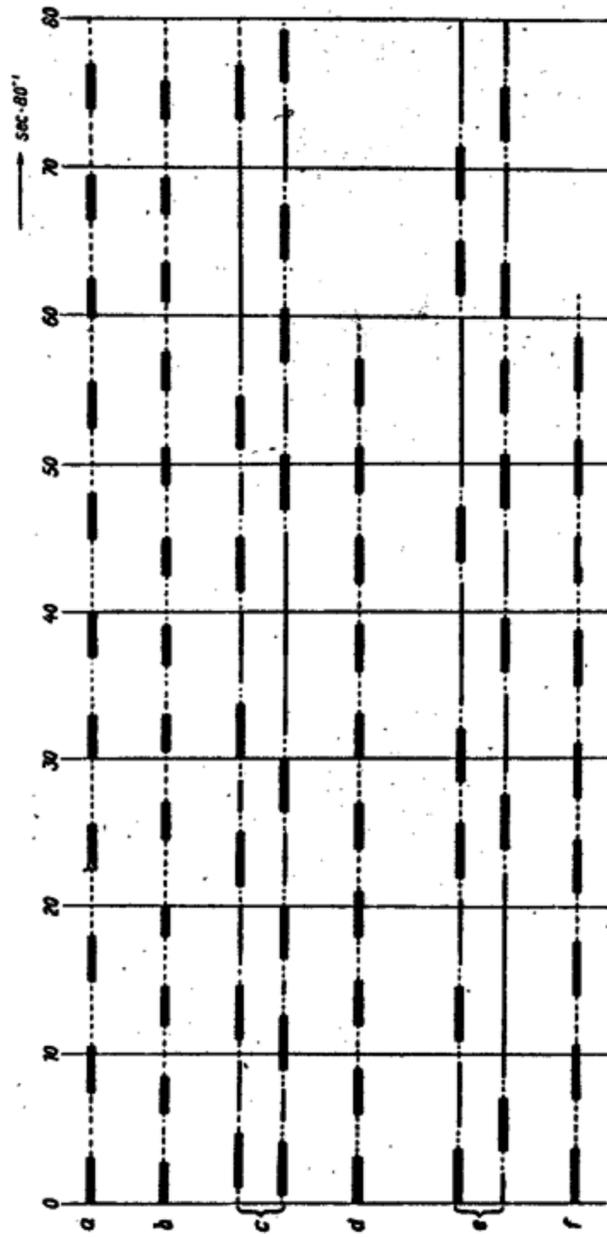


Abb. 9. Flügelbewegung bei verschiedenen Formen des Kraftfluges, Schema nach ausgewerteten Filmaufnahmen

a) *Sturnus vulgaris*, Flug mit Höchstgeschwindigkeit, b) *Sturnus vulgaris*, Schnellflug, c) *Sturnus vulgaris*, Streckenflug mit geringerer Geschwindigkeit, sogenannter Schonflug, d) *Sturnus vulgaris*, waagerechter Start, e) *Turdus merula*, Streckenflug, f) *Turdus merula*, waagerechter Start

Starke ausgezogene Linie = Abschlag, unterbrochene Linie = Aufschlag, dünne ausgezogene Linie = Anhalten

Bei Star und Amsel ändert sich aber nicht nur das Zeitmuster der Flügelschläge bei verschiedenen Flugzuständen, sondern auch die Schlagamplitude. Die Abb. 10-16 stellen die aus den Filmaufnahmen konstruierte Bahnkurve der Flügelspitze dar. Die Flügelspitze bewegt sich im Abschlag (von hinten, d. h. in Richtung der Drehachse des Flügels gesehen) ziemlich genau auf einem Kreisbogen, von der Seite gesehen beschreibt sie eine flache, ellipsenähnliche Kurve²⁾. Beim Streckenflug steht die Schlagenebene senkrecht auf der Flugrichtung. Beim Start (und noch stärker beim Steigflug) ist sie gegen die Flugrichtung nach hinten geneigt. Beim stark gebremsten Flug (Star) beträgt diese Neigung etwa einen halben rechten Winkel gegen die Flugrichtung, allerdings ist dann auch die Körperlängsachse schräg gestellt. Der Schlagwinkel wird im allgemeinen von einer durch beide Schultergelenke verlaufenden Geraden halbiert,

¹⁾ Nach GREENEWALT gilt die Beziehung $n \cdot l_H^x = 3540$ ($n = \text{Flügelschläge/sec}$, $l_H = \text{Flügelänge in mm als Abstand Flügelspitze - Handgelenk}$). $x = 1$ bis $1,25$, Durchschnittswert $1,15$. Für den Star ergibt sich bei $l_H = 131 \text{ mm}$ und $n = 11$ bzw. 13 $x = 1,18$ bzw. $1,15$.

²⁾ Für die spätere Berechnung wird diese schwache Krümmung vernachlässigt und durch eine Gerade ersetzt.

nur beim gebremsten Flug des Stars liegen die Flügelspitzen bei Beginn näher beieinander als am Ende des Abschlages. Der Schlagwinkel ist im allgemeinen um so größer, als der Vortrieb im Verhältnis zum Auftrieb stärker wird. Deshalb ist er beim Start am größten. Jedoch ist dann nicht sofort einzusehen, warum der Star beim langsamen Streckenflug einen größeren Schlagwinkel hat als beim Schnellflug mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 65 km/h . Daß zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit (70 km/h und mehr) wieder ein größerer Schlagwinkel erforderlich ist, ist verständlich. Aber er übertrifft sogar noch denjenigen beim Start. Auf diese Fragen kann erst die Berechnung der Flugzustände Antwort geben. Man kann aber übersehen, daß offensichtlich die zeitliche Verteilung der Flügelabschläge dabei eine Rolle spielt (s. Abb. 9).

Grundlagen der Flugberechnung

1. Berechnung der Luftkräfte

Die Theorie der Luftkraftezeugung durch schwingende Flügel findet man bei KÜSSNER (1936). VON HOLST und KÜCHEMANN (1941) haben dargelegt, daß die strenge Theorie des instationären Auftriebs sehr vereinfacht werden kann, wenn die Schwingungszahl nicht zu groß und die Fluggeschwindigkeit nicht zu klein ist. Das ist bei

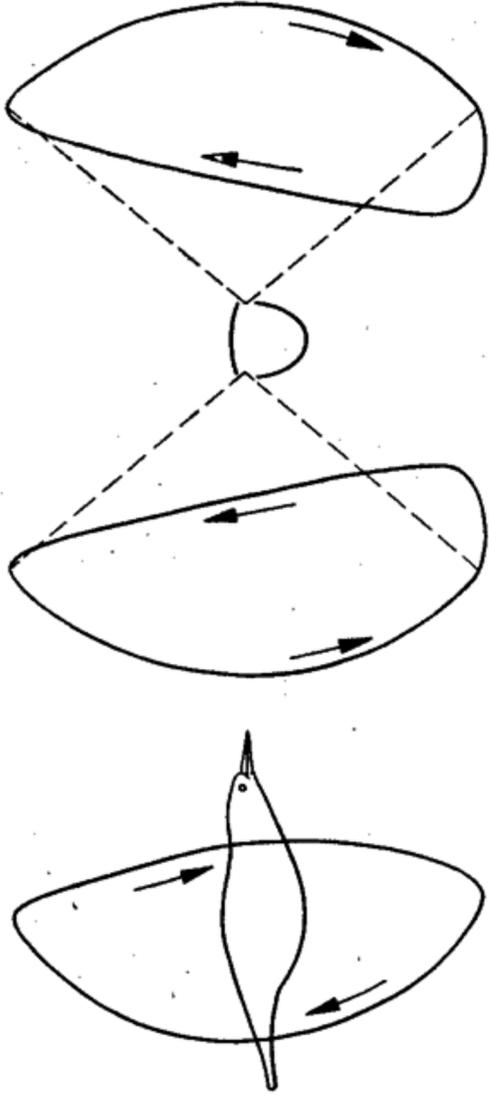


Abb. 10. *Sturnus vulgaris*, Schnellflug (Bahnkurve der Flügelspitze, links: Ansicht quer zur Flugrichtung, rechts: Ansicht in Flugrichtung). Das gleiche gilt für die Abb. 11-16)

mittelgroßen und großen Vögeln der Fall. Diese Grenzbedingung wird durch die sogenannte reduzierte Frequenz ν gegeben ($\nu = n \cdot \frac{l}{v}$, $n = \text{Zahl der Flügelschläge pro Sekunde}$, $l = \text{Länge des Flügels vom Schultergelenk bis zur Flügelspitze}$, $v = \text{Fluggeschwindigkeit}$). Für $\nu \leq 0,2$ können die Strömungsverhältnisse als stationär angenommen werden. Die unter dieser Voraussetzung formulierte Theorie erklärt die

bekanntesten Tatsachen der Flügelbewegung der Großvögel, die sich aus zwei Einzelbewegungen zusammensetzt: der Schlagschwingung (Ab- und Aufschlag) und der Drehschwingung (Pronation und Supination des Flügels). Auf dieser Grundlage ließen sich Auftrieb und Schub berechnen, wenn außer der Fluggeschwindigkeit und

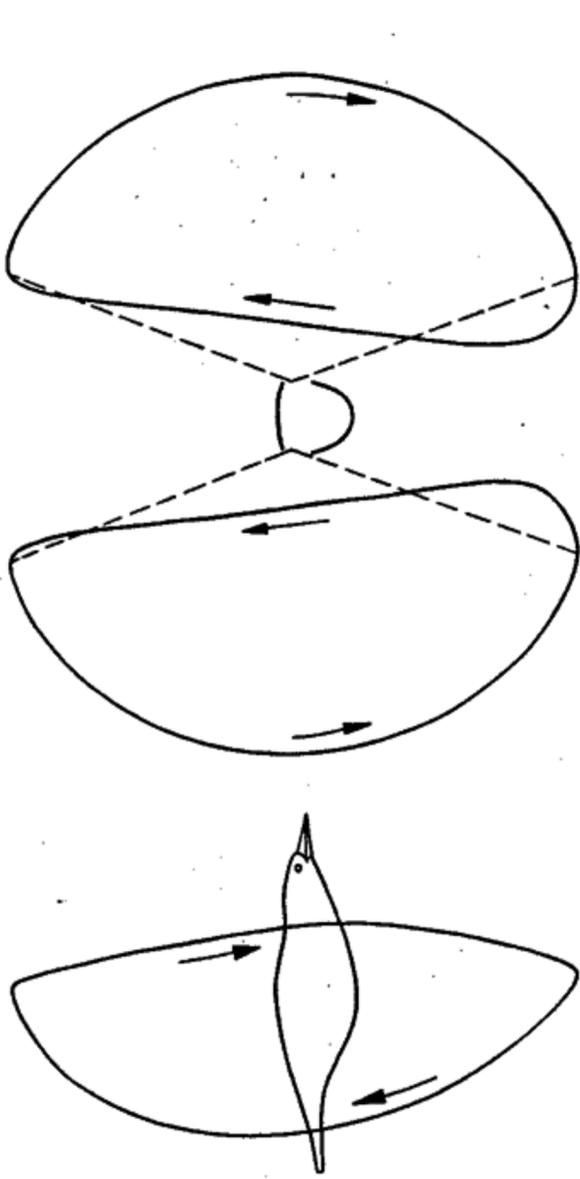


Abb. 11. *Sturnus vulgaris*, Flug mit Höchstgeschwindigkeit

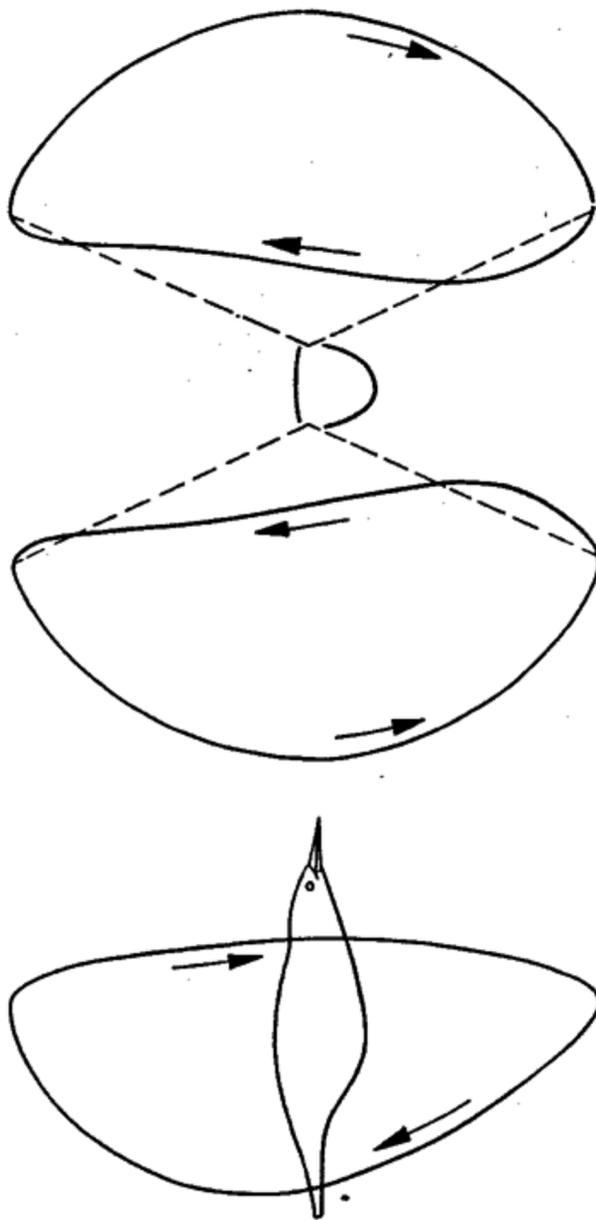


Abb. 12. *Sturnus vulgaris*, Schonflug

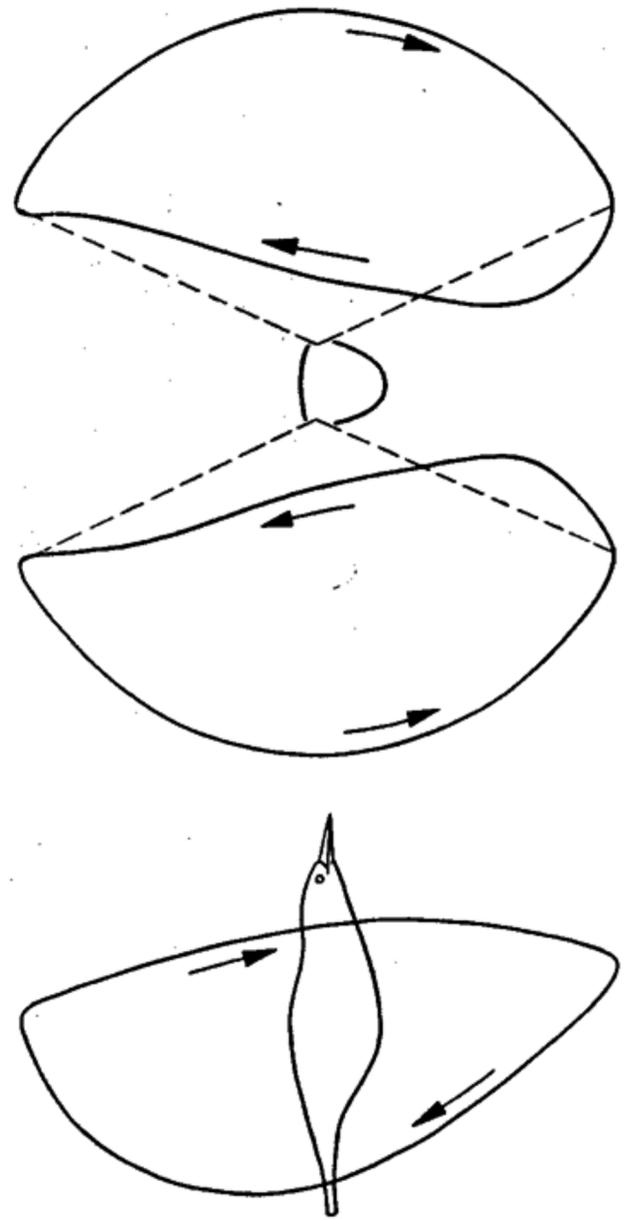


Abb. 13. *Sturnus vulgaris*, waagerechter Start

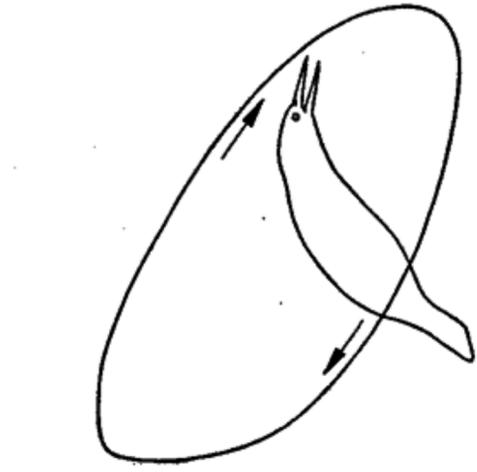


Abb. 14. *Sturnus vulgaris*, gebremster Flug (rechts: Ansicht in Richtung der schräg gestellten Körperlängsachse)

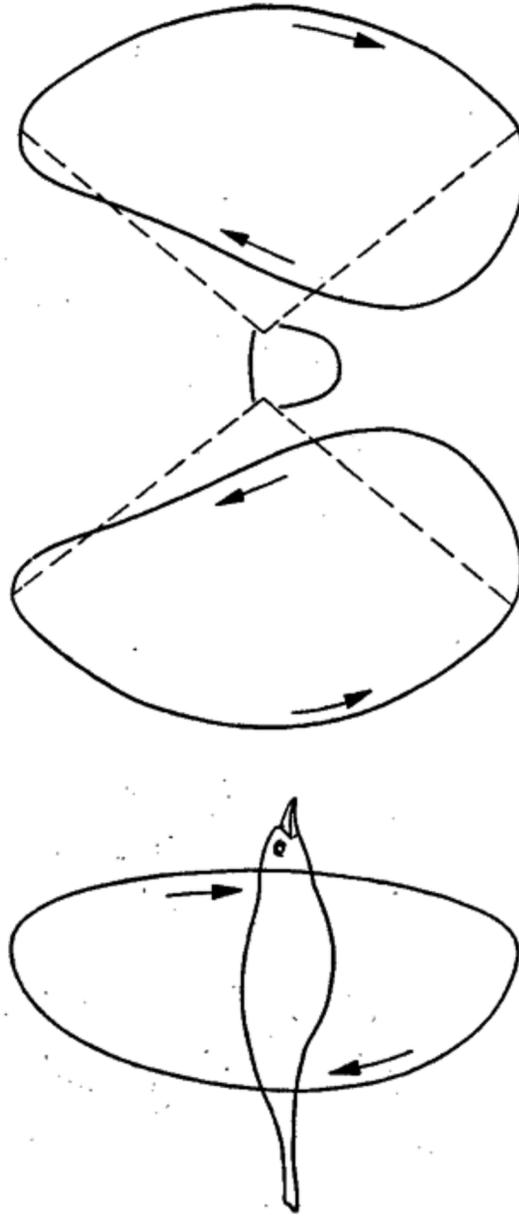


Abb. 15. *Turdus merula*, Streckenflug

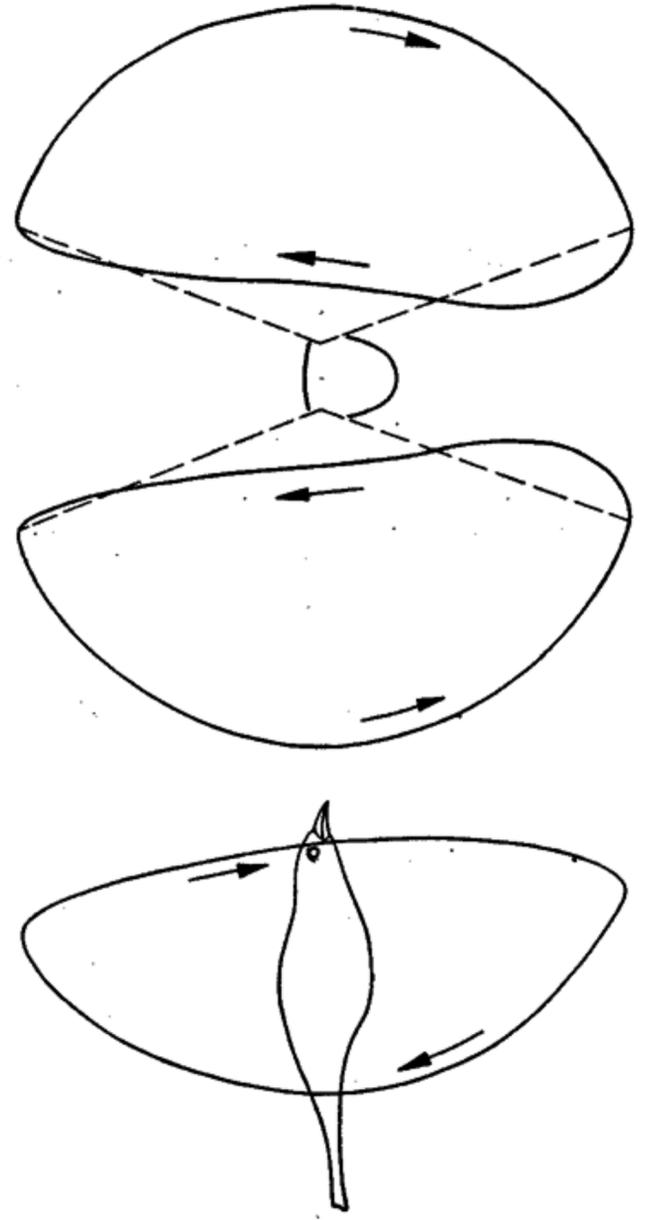


Abb. 16. *Turdus merula*, waagerechter Start

der Winkelgeschwindigkeit des Flügels noch die Anstellwinkel der Flügelprofile vom Schultergelenk fortschreitend bis zur Flügelspitze bekannt sind. Die letzteren sind aber am fliegenden Vogel nicht zu messen. Daher mußte nach einer Berechnungsmöglichkeit gesucht werden, die ohne solche Anstellwinkelmessungen auskommt.

Zunächst soll aber untersucht werden, ob der Kraftflug von Amsel und Star in den Bereich der genannten quasistationären Theorie fällt. Für den Star ergibt sich die reduzierte Frequenz beim Schnellflug für $n = 13 \text{ sec}^{-1}$, $v = 18 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ und $l = 0,181 \text{ m}^3$ zu $\nu \approx 0,13$. Während des Starts mit $n = 13,5 \text{ sec}^{-1}$ und $v = 10 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ist $\nu \approx 0,24$. Die Amsel hat beim Start mit $n = 12 \text{ sec}^{-1}$, $v = 8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ und $l = 0,195 \text{ m}^3$ eine reduzierte Frequenz $\nu \approx 0,29$. Das bedeutet, daß beim Start, besonders zu Beginn, wo die Winkelgeschwindigkeiten ja noch kleiner sind, die instationären Einflüsse (periodisch abgehende Wirbel und Massenbeschleunigung der Luft) deutlich würden. Nun ist aber bei unseren beiden Arten der Flügel nur während des Abschlages wirksam, während er im Aufschlag durch Zusammenfallen und enges Heranführen an den Körper praktisch als querkrafterzeugende Fläche ausfällt. Die instationäre Tragflügeltheorie geht aber von einer *auf- und abschwingenden* Fläche aus. Außerdem ist beim langsamen Streckenflug des Stars und beim Streckenflug der Amsel die Schlagfolge unregelmäßig, so daß eine „Schlagfrequenz“ im strengen Sinne gar nicht bestimmt werden kann. Da sich die Berechnung des Kraftfluges somit auf die Erfassung der im Abschlag erzeugten Luftkräfte reduziert, ergibt sich die Möglichkeit, den Flügel wie ein Propellerblatt zu behandeln. VON DOEPP (1936) hat gezeigt, wie sich die Luftkräfte an der Luftschraube ohne großen Aufwand näherungsweise berechnen lassen. Da sich die folgenden Rechnungen auf dieser Darstellung aufbauen, ist es angezeigt, zunächst die Konzeption von DOEPPs zu erläutern.

Die an den Luftschraubenblättern erzeugte aerodynamische Querkraft⁵⁾ wird gleichgesetzt dieser Kraft an einem gleichwertigen Tragflügel, der mit der gleichen Geschwindigkeit angeblasen wird wie das Luftschraubenprofil bei $0,7r$ ($r =$ Radius der Luftschraube). Für die folgenden Darlegungen ist die Abb. 17 heranzuziehen. Die Fluggeschwindigkeit ist v , die Umfangsgeschwindigkeit bei $0,7r$ ist $u_{0,7}$. Das Profil wird mit der Geschwindigkeit w_1 unter dem Winkel α angeblasen, und es entsteht die Querkraft Q und der Widerstand W . Die Querkraft bewirkt eine Ablenkung der Strömung: es wird eine senkrecht zu w_1 verlaufende Geschwindigkeit Δw „induziert“. So ergibt sich der induzierte Winkel α_i zwischen der „wahren“ Anblasrichtung w_1 und der geometrischen Anblasrichtung w ($w = \sqrt{v^2 + u_{0,7}^2}$). Für den induzierten Winkel gilt $\alpha_i = \frac{\Delta w}{w}$ ⁶⁾. Der Winkel γ ist der sogenannte Fortschrittswinkel, seine

Tangensfunktion $\frac{v}{u_{0,7}} = \lambda_{0,7} = \text{tg } \gamma$ ist der „Fortschrittsgrad“ der Luftschraube bei $0,7r$.

⁵⁾ Zur Bestimmung von l s. S. 434.

⁶⁾ s. S. 445.

⁵⁾ Die senkrecht zur Anblasrichtung wirkende Kraft wird hier Querkraft genannt. In der Flügeltchnik wird dafür durchweg der Ausdruck Auftrieb verwendet. Mit Auftrieb wird hier aber nur eine Kraft bezeichnet, die der Schwerkraft des Vogels entgegenwirkt.

⁶⁾ Winkel werden, wenn nicht besonders vermerkt, im Bogenmaß angegeben.

Die von der Luftschraube erzeugte Querkraft ist

$$Q = \pi r^2 \rho v_a \cdot 2 \Delta w = 4 \pi r^2 \rho w \alpha_i \sin(\gamma + \alpha_i) = \pi D^2 \rho w \alpha_i \sin(\gamma + \alpha_i).$$

Hier ist q_w der Staudruck der Anblasgeschwindigkeit. Da $w = w_1$ gesetzt werden kann, ist $q_w \approx \frac{v^2 + u_{0,7}^2}{16}$. $D = 2r$ ist der Luftschraubendurchmesser.

$$\text{Dann ist } \alpha_i = \frac{Q}{\pi D^2 \rho w \sin(\gamma + \alpha_i)}.$$

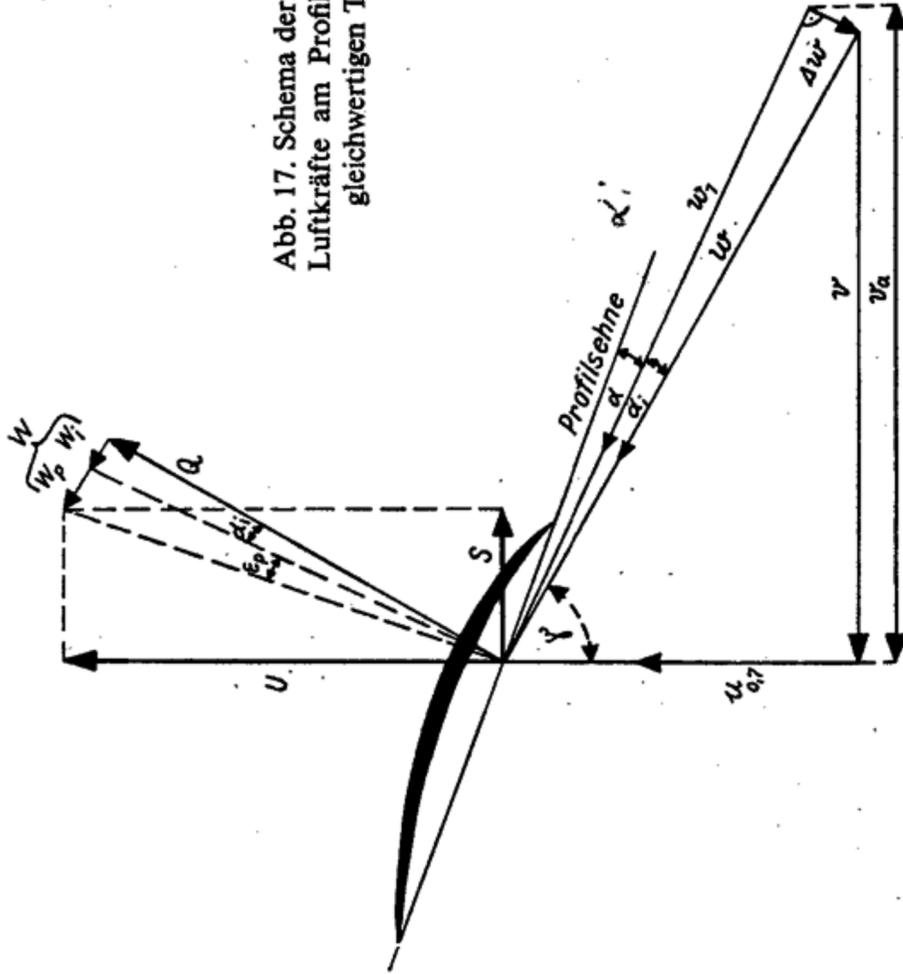


Abb. 17. Schema der Geschwindigkeiten und Luftkräfte am Profil des der Luftschraube gleichwertigen Tragflügels (s. Text)

Da die Querkraft auch bestimmt ist durch die Gleichung $Q = c_a \cdot F \cdot q_w$ ($c_a =$ Querkraftbeiwert, $F =$ Flügelfläche der Propellerflügel), kann man schreiben $\alpha_i = \frac{c_a \cdot F}{\pi D^2 \sin(\gamma + \alpha_i)} \cdot \frac{F}{D^2}$ ist das Seitenverhältnis der Luftschraube $= \frac{1}{A} \left(A = \text{Flügelstreckung oder Streckung der Propellerflügel } \frac{D^2}{F} \right)$.

$$\text{Damit wird } \alpha_i = \frac{1}{\pi \sin(\gamma + \alpha_i)} \cdot \frac{c_a \cdot \frac{1}{A}}{\pi \sin(\gamma + \alpha_i)}.$$

Da α_i immer klein bleibt, läßt sich setzen $\cos \alpha_i = 1$ und $\sin \alpha_i = \alpha_i$. Unter dieser Voraussetzung geht die Gleichung

$$\begin{aligned} \sin(\gamma + \alpha_i) &= \sin \gamma \cos \alpha_i + \cos \gamma \sin \alpha_i \\ \sin(\gamma + \alpha_i) &= \sin \gamma + \alpha_i \cos \gamma. \end{aligned}$$

Aus der Gleichung für α_i läßt sich nun entwickeln

$$\alpha_i^2 \cos \gamma + \alpha_i \sin \gamma - \frac{1}{\pi} \frac{c_a \cdot \Delta}{\lambda_{0,7}} = 0$$

$$\alpha_i = 0,5 \operatorname{tg} \gamma \left(\sqrt{1 + \frac{4 c_a \cdot \frac{1}{\lambda_{0,7}}}{\pi \sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}} - 1 \right)$$

$$\text{oder} \quad \alpha_i = 0,5 \lambda_{0,7} \left(\sqrt{1 + \frac{4 c_a \cdot \frac{1}{\lambda_{0,7}}}{\pi \lambda_{0,7}^2} - 1} \right)$$

Zur näherungsweisen Berechnung von Q braucht man

1. den Fortschrittsgrad bei $0,7 r (= \lambda_{0,7})$. Er läßt sich aus v und $u_{0,7}$ berechnen.
2. Den Querkraftbeiwert des Flügelprofils (c_a)
3. die Flügelstreckung Δ .

(Aus diesen drei Größen erhält man α_i . Der induzierte Winkel α_i und der von ihm abhängige induzierte Widerstand sind größer als beim normalen Tragflügel und erfassen die durch die Kreisbewegung erfolgende Massenbeschleunigung der Luft zum größten Teil mit.)

4. Den Staudruck der Relativgeschwindigkeit $w(q_w)$, der aus v und $u_{0,7}$ berechnet wird.

5. Den Schraubendurchmesser D .
(Aus α_i , q_w und D errechnet man Q .)

Der Widerstand der Luftschraube ist $W = W_p + W_i$ ($W_p =$ Profilwiderstand, $W_i =$ induzierter Widerstand), dabei ist $W_p = Q \cdot \epsilon_p$ und $W_i = Q \cdot \alpha_i (\epsilon_p \cong$ Profilvergleichzahl $\frac{c_{w,p}}{c_a}$, $c_{w,p} =$ Beiwert des Profilwiderstandes). Der Schub ergibt sich zu $S = Q \cdot \cos \gamma - W \cdot \sin \gamma = Q \cdot \frac{1 - \lambda_{0,7} (\epsilon_p + \alpha_i)}{\sqrt{1 + \lambda_{0,7}^2}}$, die Umfangskraft zu $U = Q \cdot \sin \gamma + W \cdot \cos \gamma = Q \cdot \frac{\lambda_{0,7} + \epsilon_p + \alpha_i}{\sqrt{1 + \lambda_{0,7}^2}}$. Die Schraubenleistung ist $N = U \cdot u_{0,7}$ und der

$$\text{Schubwirkungsgrad } \eta = \frac{S \cdot v}{U \cdot u_{0,7}}$$

Um diese Berechnung auf das niederschlagende Flügelpaar anwenden zu können, sind einige Ergänzungen nötig. Beim Propeller addieren sich die an jedem Luftschraubenblatt erzeugten Schubkräfte $\left(\frac{S}{2}\right)$ zum Gesamtschub, während sich die Teilumfangskräfte $\left(\frac{U}{2}\right)$ in ihrer Wirkung aufheben (Abb. 18a), so daß die Luftschraube nur Schub liefert. Die beiden Flügel des Vogels jedoch haben entgegengesetzten Drehsinn (Abb. 18b). Deshalb wird die aus den Teilumfangskräften hervor-

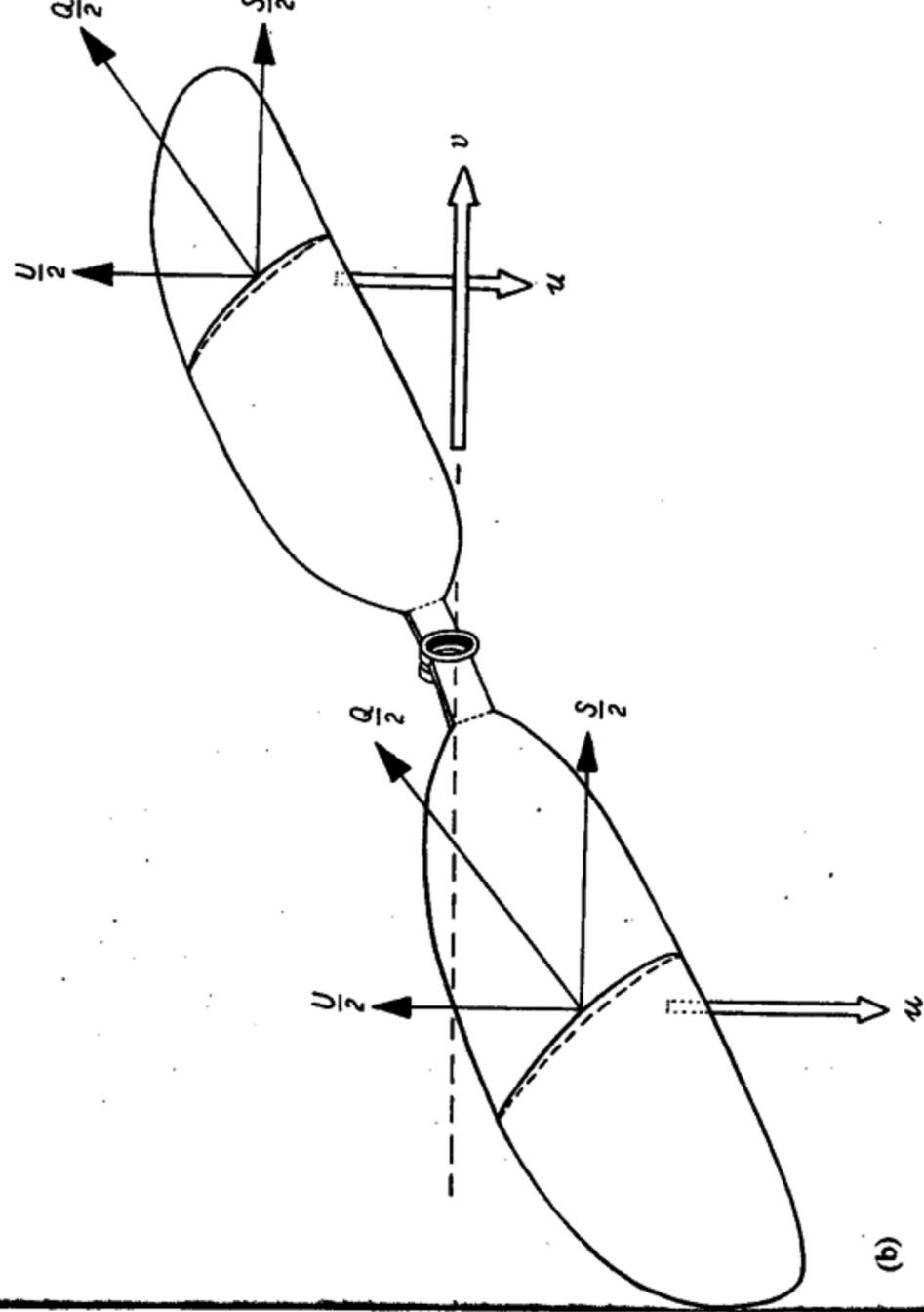
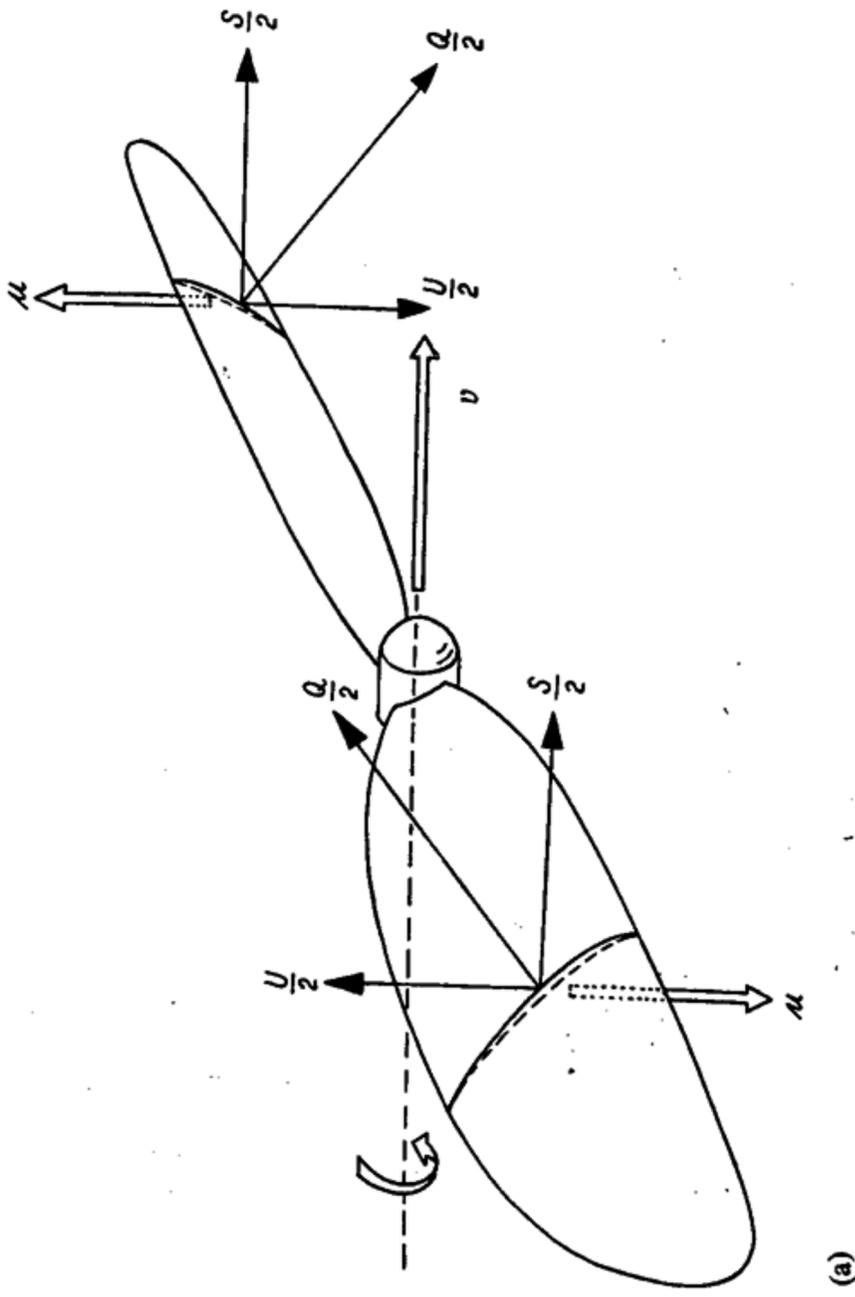


Abb. 18. Schema der Luftkräfte am Propeller (a) und am Flügelpaar (b) (s. Text)

gehende Umfangskraft hier als nach oben gerichtete Kraft (Auftrieb) wirksam, jedoch nicht in voller Höhe. Der als Auftrieb (A) in Erscheinung tretende Anteil hängt von der Größe des Schlagwinkels (φ) ab (s. Abb. 19). Durchläuft der Flügel den Winkel φ vom oberen zum unteren Umkehrpunkt, so ist bei gleichbleibender Umfangskraft der Auftrieb in der horizontalen Stellung am größten, nämlich gleich der Umfangskraft,

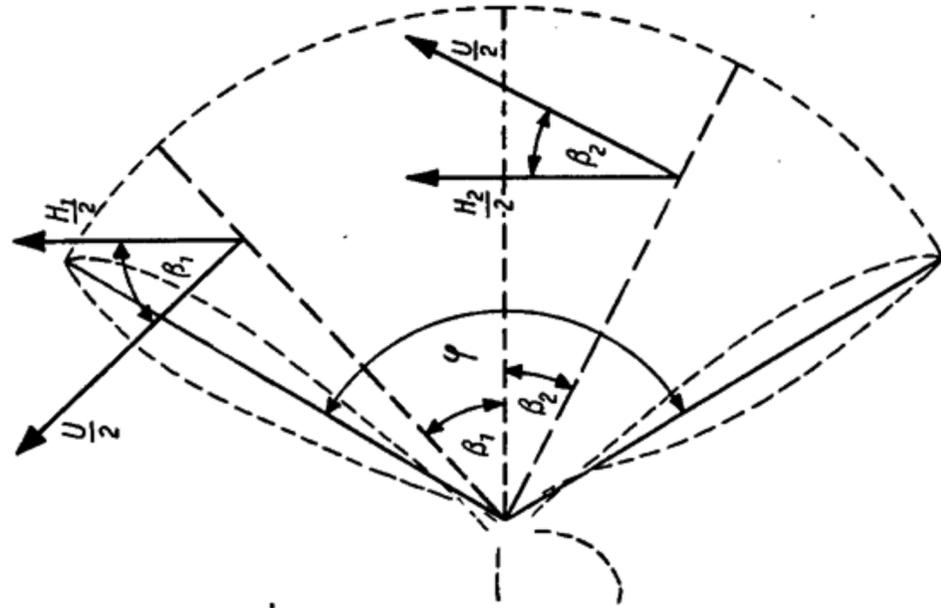


Abb. 19. Schema der Luftkräfte zur Berechnung des Auftriebs in Abhängigkeit vom Schlagwinkel (s. Text)

in jeder anderen. Stellung kleiner. Der während des gesamten Abschlags wirksame durchschnittliche Auftrieb ist $A = U \frac{2 \sin \varphi/2}{\varphi}$. Zur Ableitung genügt die Betrachtung eines Flügels. Bei gleichbleibender Umfangskraft $\left(\frac{U}{2}\right)$ ist die Auftriebskomponente $\left(\frac{H}{2}\right)$ vom Winkel des Flügels mit der Winkelhalbierenden des Schlagwinkels (β) abhängig:

$$\frac{H_1}{2} = \frac{U}{2} \cos \beta_1, \quad \frac{H_2}{2} = \frac{U}{2} \cos \beta_2 \dots \frac{H}{2} = \frac{U}{2} \cos \beta.$$

Daraus ergibt sich für beide Flügel sofort $H = U \cos \beta$. Für den durchschnittlichen Auftrieb beider Flügel während des Abschlags erhält man

$$A = \frac{1}{\varphi} \sum_{-\varphi/2}^{+\varphi/2} H = \frac{1}{\varphi} \int_{-\varphi/2}^{+\varphi/2} U \cos \beta d\beta = U \frac{2 \sin \varphi/2}{\varphi}$$

Die effektiven Größen für Auftrieb (\bar{A}) und Schub (\bar{S}) in einem bestimmten Flugzustand erhält man, wenn man den durchschnittlichen Zeitanteil (f) berücksichtigt, in dem die Flügel als Propellerblatt wirksam sind. Das ist der Zeitanteil der Abschlagphasen. Die für den Flugzustand charakteristischen Luftkräfte ergeben sich zu $\bar{A} = A \cdot f$ und $\bar{S} = S \cdot f$. Die effektive Schwingenleistung (entsprechend der Schraubenleistung) ist $\bar{N} = N \cdot f$. Der Vortriebswirkungsgrad des Schwingenschlages ist dagegen nicht von f abhängig.

Zur Kennzeichnung des Kraftfluges dienen noch zwei Größen: der Schubbeiwert und das Verhältnis Auftrieb:Schub. Letzteres ergibt sich aus dem Gesamtauftrieb (\bar{A}_{ges}) und \bar{S} als $\frac{\bar{A}_{ges}}{\bar{S}}$. Der Schubbeiwert ist auf die Flügelfläche und die Fluggeschwindigkeit bezogen: $c_s = \frac{\bar{A}_{ges}}{\bar{S} \cdot 16} = \frac{F \cdot q_0}{F \cdot v^2}$ (q_0 = Staudruck der Fluggeschwindigkeit). Da $q_0 \approx \frac{v^2}{16}$ ist, wird $c_s = \frac{\bar{A}_{ges}}{F \cdot v^2}$. Der Schubbeiwert ist der Größe nach gleich dem Beiwert des Rumpfwiderstandes.

Das Rechenverfahren verläuft also so: man denkt sich die beiden Flügel mit den Gelenkköpfen der Oberarmknochen zu einem zweiflügeligen Propeller vereinigt und berechnet aus den gemessenen Ausgangswerten Schub und Umfangskraft, dann berücksichtigt man die Besonderheiten der Flügelbewegung und berechnet die effektiven Größen von Schub und Auftrieb. Da bei dieser Rechnung nur die sich drehenden Teile eine Rolle spielen, ist es gleichgültig, ob sich die Flügel auf einer Achse drehen wie in Abb. 18b oder ob die Drehachsen am Vogelkörper um den Abstand der Schultergelenke auseinander liegen. Man benötigt als Ausgangswerte die Fluggeschwindigkeit v den Schlagwinkel φ , den Zeitfaktor f , die Flügelstreckung Δ und die Beiwerte des Profils c_a und c_w . Die Umfangsgeschwindigkeit ($u_{0,7}$) läßt sich einfach berechnen. Der Zeitlupenfilm gibt den durchlaufenen Winkelbetrag $\Delta \varphi$ für $\frac{1}{80}$ sec. Dann ist die Winkelgeschwindigkeit des niederschlagenden Flügels

$$\omega = \frac{\Delta \varphi \cdot \pi}{180} \cdot 80 \cdot \text{sec}^{-1} \quad (\Delta \varphi \text{ in } ^\circ \text{ gemessen}).$$

Die Umfangsgeschwindigkeit bei 0,7 l (statt des Radius r der Luftschraube verwenden wir jetzt die Flügelänge l = Abstand Schultergelenk - Flügelspitze) ist $u_{0,7} = 0,7 \omega l$. l wird als Durchschnittswert aus Messungen am Präparat verwendet (s. S. 434). Den Schlagwinkel φ erhält man aus den Zeitlupenaufnahmen. Die Feststellung von A (und l) sowie c_a und c_w , bedarf einer besonderen Erörterung.

2. Flügelfläche, Flügelänge, Flügelstreckung

Die Flügelstreckung wird beim Tragflügel aus der Spannweite s und der Flügelfläche F nach der Formel $A = \frac{s^2}{F}$ berechnet. Analog verfährt man bei der Luft-

⁷⁾ Im einfachsten Fall ist $\bar{A}_{ges} = \bar{A}$. Wenn aber außer dem Flügelabschlag noch andere Auftriebsquellen vorhanden sind, ist $\bar{A}_{ges} > \bar{A}$.

schraube, bei der an die Stelle von s der Schraubendurchmesser D und an die Stelle der Flügelfläche die Fläche beider Schraubenblätter treten. Geht man von einem Flügel des Vogels aus, so entspricht die Flügelänge vom Schultergelenk bis zur Flügelspitze $l = \frac{D}{2}$ und die Flügelfläche $F_1 = \frac{F}{2}$. Sodann ergibt sich für die Flügelstreckung $A = \frac{D^2}{F} = \frac{(2l)^2}{2F_1} = \frac{2l^2}{F_1}$. An jeweils 5 photographierten Präparaten (s. S. 416) wurden l und F_1 bestimmt und A berechnet. Die Mittelwerte dienten der Flugberechnung. Die Fläche F_1 wurde so gemessen, daß die Spalten zwischen den äußeren Handschwingen in der Flügelfläche verbleiben, da die gespreizte Hand als ein Flügel mit unterteiltem Profil aufzufassen ist.

Tabelle 1. Kenngrößen des Flügels

	F_1 (m ²)	l (m)	$A = \frac{2l^2}{F_1}$	$\frac{1}{A}$
<i>Sturnus vulgaris</i>	0,0102–0,0109	0,178–0,184	6,24	0,16
Durchschnitt	0,0105	0,181		
<i>Turdus merula</i>	0,0141–0,0150	0,192–0,200	5,22	0,19
Durchschnitt	0,0146	0,195		

3. Querkraftbeiwert c_a und Widerstandsbeiwert c_w

Die Größe der Beiwerte hängt einmal vom Anstellwinkel des Profils ab, dann aber vor allem von seiner Form. Der Querkraftbeiwert und der Widerstandsbeiwert erfordern mit wachsendem Anstellwinkel charakteristische Veränderungen, die sich im Polardiagramm darstellen lassen. Für die Durchrechnung einzelner Flugzustände muß man wissen, welche Werte c_a und c_w für bestimmte Anstellwinkel jeweils haben. Da keine Windkanalmessungen an den Flügeln selbst möglich waren, mußte eine Ersatzlösung gefunden werden.

In der Abb. 20 sind die Flügelquerschnitte von Star und Amsel bei 0,25 l , 0,5 l und 0,7 l dargestellt. Es sind durchweg dünne gewölbte Profile mit \pm spitzer Profilnase. Die Wölbung nimmt von distal nach proximal zu. Um einen schnellen Vergleich zu ermöglichen, wurden die Profile aufgemessen und die Querverwölbung bei den distalen Schnitten ausgeglichen. Das Ergebnis zeigt Abb. 21. Den Vergleich mit einigen Göttinger Profilen gibt die Abb. 22. Ihre Aufmaße sind in den „Ergebnissen der aerodynamischen Versuchsanstalt Liefg. I und III“ sowie bei SCHMITZ (1952) zu finden. Die Vogelprofile kommen den Göttinger Profilen 417a und 464 sehr nahe. Das dicke Profil Gö 625 (als typisches Flugzeugprofil) dient als Vergleich. Die Polaren der drei dünnen Profile (Abb. 23) sind ähnlich, das stärker gewölbte Gö 464 besitzt größere Maximalquerkraft, aber auch höheren Widerstand. Die drei Polaren stammen aus Messungen mit großen REYNOLDSSCHEN Zahlen. Diese Re-Zahl ist für die Änderung der Querkraft- und Widerstandsbeiwerte von verschiedenen Profilen mit steigendem

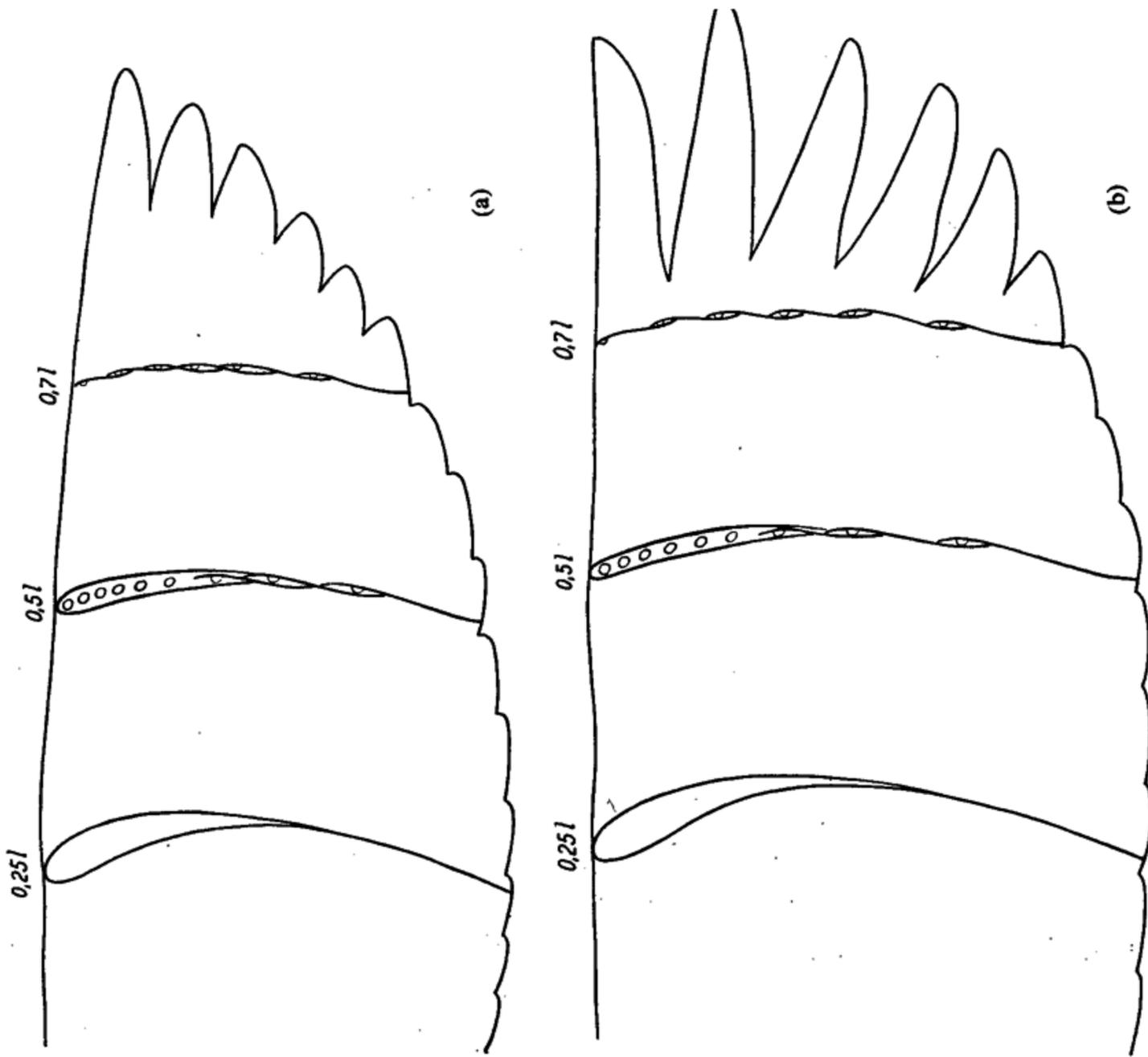


Abb. 20. Flügelumriß mit eingezeichneten Flügelprofilen
a) *Sturnus vulgaris*, b) *Turdus merula*



Abb. 21. Flügelprofile von *Sturnus vulgaris* (a) und *Turdus merula* (b)

Anstellwinkel von Bedeutung. Sie gibt das Verhältnis Beschleunigungsarbeit: Reibungsarbeit längs der Tiefe des umströmten Profils an und läßt sich überschlagsmäßig berechnen: $Re = \text{Anblasgeschwindigkeit (in m} \cdot \text{sec}^{-1}) \cdot \text{Flügeliefe (in mm)} \cdot 70$. (Genaueres über Re-Zahl siehe Lehrbücher d. Physik, eine gute Darstellung findet sich bei SCHMITZ 1952.)

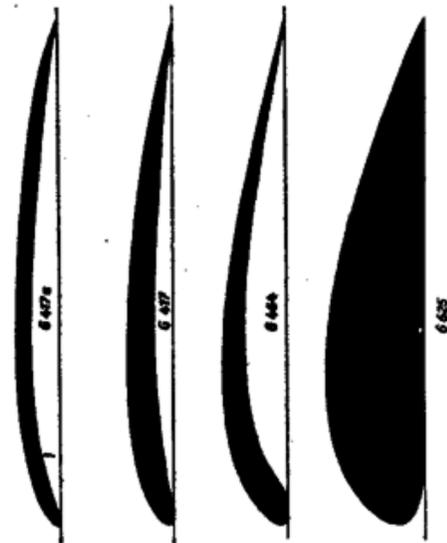


Abb. 22. Göttinger Profile zum Vergleich mit denen der Abb. 21

Abb. 23. Polaren von drei Göttinger Profilen bei $Re = 420000$... + ... + G 417a, - - - x - - - G 417, - · - · - · - G 464. Die angegebenen Anstellwinkel gelten für $\lambda = \infty$, somit tritt als Widerstand nur der Profilwiderstand (c_{wp}) auf.

Die Werte wurden den Tabellen der „Ergebnisse der aerodynamischen Versuchsanstalt, Lieferung I und III“ entnommen und von $\lambda = 5$ auf $\lambda = \infty$ umgerechnet

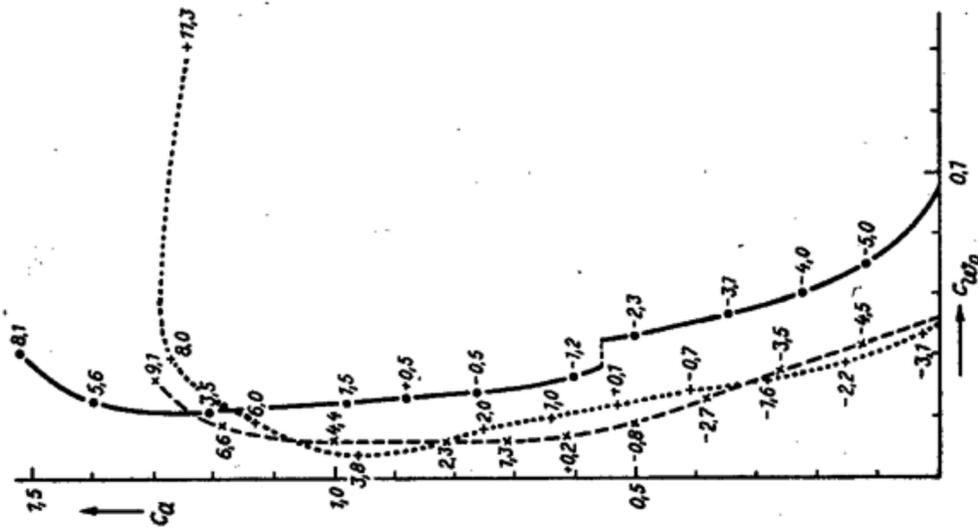


Abb. 24 zeigt die Polaren von Gö 417a und Gö 625 bei hoher und niedriger Re-Zahl. Während ihre Verringerung bei dem dünnen Profil auf $\frac{1}{10}$ zwar zu einem Absinken der Höchstquerkraft und einer geringen Vergrößerung des Profilwiderstandes führt, wird das dicke Flügelprofil bei gleicher Re-Zahl-Änderung unbrauchbar. Die „Kennzahlunempfindlichkeit“ dünner spitznasiger Profile hat SCHMITZ (1952) ausführlich erörtert.

Es ist nun festzustellen, in welchem Re-Zahl-Bereich die Vogelflügel arbeiten. Zu diesem Zweck wird es genügen, die Re-Zahlen für verschiedene Geschwindigkeiten an der „mittleren Flügeliefe“ $t_m = \frac{F_1}{l}$ auszurechnen.

Die Re-Zahlen der Vogelflügel liegen in dem Bereich, wo die dünnen Profile am vorteilhaftesten sind. Es sei hier auch darauf hingewiesen, daß die Querwellung des Flügels durch die Schwungfedern und die Oberflächenrauigkeit der Federn sich

Tabelle 2. REYNOLDSsche Zahlen

Anblasgeschwindigkeit (m · sec ⁻¹)	Re <i>Sturnus vulgaris</i> ($t_m = 58$ mm)	Re <i>Turdus merula</i> ($t_m = 75$ mm)
10	40600	52500
15	60900	78750
20	81200	105000

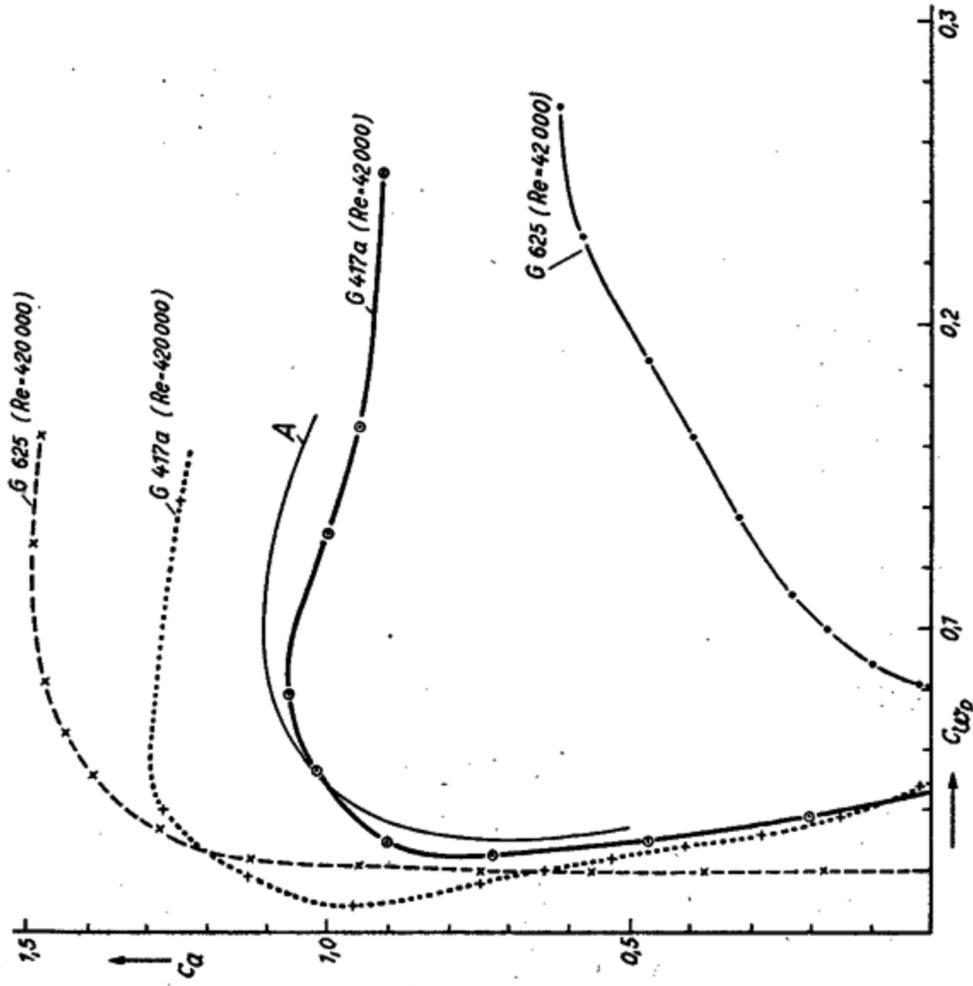


Abb. 24. Polaren von dünnem, spitznasigem und dickem, rundnasigem Profil bei verschiedenen Re-Zahlen. Die Werte wurden den Tabellen von SCHMITZ (1952) entnommen. A = geschätzte Polare des Amselflügels (s. S. 441)

günstig auf die Strömungsverhältnisse auswirken im Gegensatz zum Flugzeug, das mit Re-Zahlen der Größenordnung $10^6 - 10^8$ fliegt (Genaueres s. bei SCHMITZ 1952).

In den folgenden Rechnungen wurde die Polare von Gö 417a bei $Re = 42000$ benutzt. Das Profil 417a kommt den Flügelprofilen bei 0,5 l am nächsten. Das Profil bei 0,7 l dürfte kleinere Beiwerte besitzen, bei 0,25 l sind diese Werte sicher höher. Die Annahme eines „durchschnittlichen“ Profils 417a für den gesamten Flügel erscheint mir erlaubt, zumal eine deutliche funktionelle Trennung von Arm- und Handflügel

wie bei großen Vögeln nicht auftritt. Aus den Darlegungen über die Re-Zahl folgt auch, daß der Verlauf der Polare für $Re = 40000$ bis 100000 sich nur unwesentlich ändert.

4. Gewichte

Das Gewicht des Vogels ist zur Kontrolle der Rechnung erforderlich, denn es muß gelten $|\bar{A}_{ges}| = |G|$. Auch hier ging es darum, die entsprechenden Durchschnittswerte zu finden. Meine Messungen stimmen mit den Angaben NIETHAMMERS (1937) gut überein.

Tabelle 3. Körpergewichte

			Durchschnitt
<i>Sturnus vulgaris</i>	NIETHAMMER	34 ♂♂ u. ♀♀	61-94 p
	eigene Messung	21 (15 ♂♂, 6 ♀♀)	65,2-91,6 p
<i>Turdus merula</i>	NIETHAMMER	17 ♂♂ u. ♀♀	75-120 p
	eigene Messung	20 (15 ♂♂, 5 ♀♀)	85,0-110,4 p

Die Gewichtsdivergenz zwischen ♂♂ und ♀♀ ist nicht berücksichtigt, da vor allem beim Star ein vorbeifliegendes Tier meist nicht nach dem Geschlecht angesprochen werden kann. Die entstehende Ungenauigkeit muß in Kauf genommen werden.

Flugtechnische Charakterisierung verschiedener Flugzustände

1. Der unbeschleunigte Horizontalflug

An den Anfang sei die ausführliche Darstellung eines Rechenbeispielles gestellt, während später nur noch die Ergebnisse angeführt werden sollen.

I. Star, Schnellflug

Ausgangswerte: $v = 18 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\Delta\varphi = 40^\circ$, $\varphi = 100^\circ$, $f = 0,4$

Winkelgeschwindigkeit des Flügels

$$\omega = \frac{40\sqrt{f}}{180} \cdot 80 \text{ sec}^{-1} = 55,85 \text{ sec}^{-1}$$

Umfangsgeschwindigkeit bei 0,7 l

$$u_{0,7} = 55,85 \cdot 0,181 \cdot 0,7 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1} = 7,08 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$$

Fortschrittswinkel bei 0,7 l

$$\text{tg } \gamma = \lambda_{0,7} = \sqrt{\frac{7,08}{18}} = 2,54; \quad \gamma = 68,51^\circ$$

Die Polare gibt zahlreiche Wertepaare c_a und c_{wp} für verschiedene Anstellwinkel. Es muß jetzt ausprobiert werden, bei welchem c_a -Wert der Auftrieb $\bar{A}_{ges} = \bar{A}$ etwa bei 81 p liegt. Ohne mehrere Proberechnungen aufzuführen, wird mit dem „passenden“ Wertepaar weitergerechnet.

Profilbeiwerte

$$c_a = 0,5, \quad c_{wp} = 0,029, \quad \epsilon_p = \frac{0,029}{0,5} = 0,058$$

Induzierter Winkel

$$\alpha_i = 0,5 \cdot 2,54 \left(\sqrt{1 + \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,16 \cdot 2,730}{6,452 \pi}} - 1 \right) = 0,02705 = 1,55^\circ$$

Staudruck

$$q_w = \frac{1}{16} (7,08^2 + 18^2) \text{ kp} \cdot \text{m}^{-2} = 23,38 \text{ kp} \cdot \text{m}^{-2}$$

Querkraft

$$\sin(\gamma + \alpha_i) = \sin(68,51^\circ + 1,55^\circ) = 0,9401, \\ Q = 4 \cdot 0,181^2 \pi \cdot 23,38 \cdot 0,02705 \cdot 0,9041 \text{ kp} = 0,245 \text{ kp}$$

Schub

$$S = 0,245 \cdot \frac{1 - 2,54(0,058 + 0,02705)}{2,730} \text{ kp} = 0,0704 \text{ kp}$$

Auftrieb

$$2 \sin \varphi/2 = 2 \sin 50^\circ = 1,532, \quad \varphi = 1,745,$$

$$\bar{S} = 0,0704 \cdot 0,4 \text{ kp} = 0,0282 \text{ kp} \\ A = 0,245 \cdot \frac{2,54 + 0,058 + 0,02705}{2,730} \cdot \frac{1,532}{1,745} \text{ kp} = 0,206 \text{ kp}$$

$$\bar{A} = 0,206 \cdot 0,4 \text{ kp} = 0,0824 \text{ kp}$$

Schwingenleistung

$$N = 0,245 \cdot \frac{2,54 + 0,058 + 0,02705}{2,730} \cdot 7,08 \text{ kp m} \cdot \text{sec}^{-1} = 1,67 \text{ kp m} \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$\bar{N} = 1,67 \cdot 0,4 \text{ kp m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,666 \text{ kp m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0089 \text{ PS}$$

Schubwirkungsgrad

$$\eta = \frac{0,0704 \cdot 18}{1,67} = 0,76$$

Auftrieb: Schub

$$\frac{\bar{A}_{ges}}{\bar{S}} = \frac{\bar{A}}{\bar{S}} = \frac{0,0824}{0,0282} = 2,92$$

Schubbeiwert

$$c_s = \frac{0,0282 \cdot 16}{0,021 \cdot 324} = 0,066$$

II. Star, Flug mit Höchstgeschwindigkeit

Ausgangswerte: $v = 20 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\Delta\varphi = 47^\circ$, $\varphi = 141^\circ$, $f = 0,4$.

Berechnete Werte für $c_a = 0,45$, $c_w = 0,03$, $\epsilon_p = 0,0667$,

$$\lambda_{0,7} = 2,41, \quad \alpha_1 = 0,02465 = 1,41^\circ,$$

$$\bar{S} = 0,0334 \text{ kp}, \quad \bar{A} = 0,0818 \text{ kp},$$

$$\bar{N} = 0,890 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0118 \text{ PS},$$

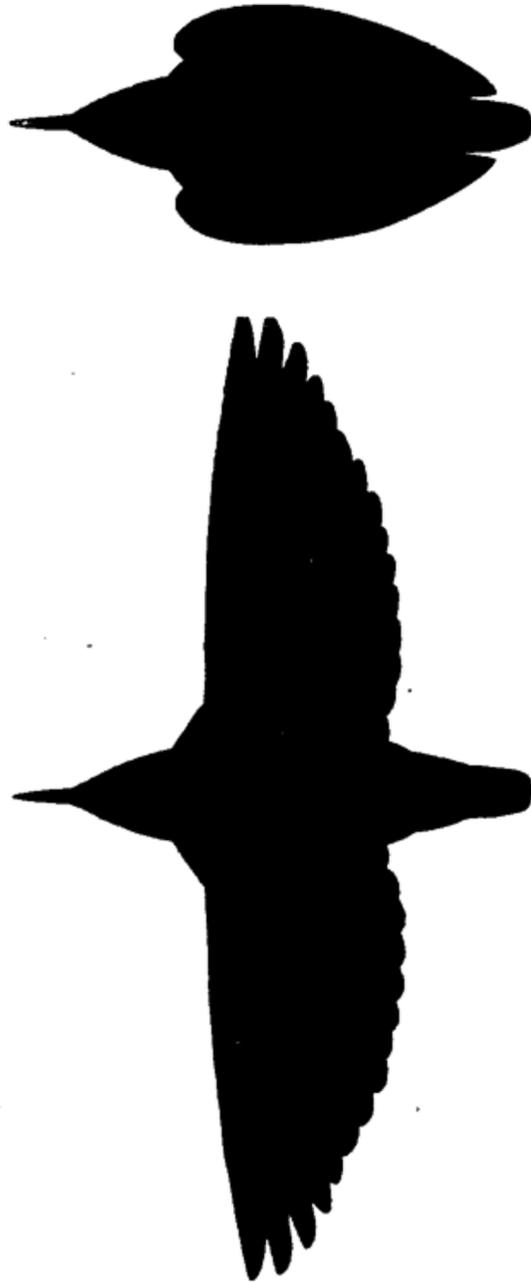
$$\eta = 0,75 \quad \frac{\bar{A}_{\text{ges}}}{\bar{S}} = \frac{\bar{A}}{\bar{S}} = 2,45,$$

$$c_s = 0,064.$$

III. Star, Flug mit geringerer Geschwindigkeit („Schonflug“)

Ausgangswerte: $v = 14,5 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\Delta\varphi = 37^\circ$, $\varphi = 130^\circ$, $f = 0,3$

Es ist zunächst eine Vorüberlegung nötig, bevor die Berechnung der Abschlagsbewegung erfolgen kann. Der Aufschlag wird meist „angehalten“. Dabei verharren die Flügel eine kurze Zeit als kleine Tragflächen beiderseits des Rumpfes



a) Abschlagstellung

b) Anhaltstellung

Abb. 25. Flugbild von *Sturnus vulgaris*

(s. Abb. 25). In dieser Stellung liefern sie wie ein Tragflügel Auftrieb. Die Fläche der beiden „Stummelflügel“ liegt bei $2F_1' = 0,005 \text{ m}^2$. Auf Grund der sehr kleinen Flügelstreckung ($\lambda = 0,35$) ist der induzierte Widerstand sehr groß. Eine überschlägige Berechnung ergibt für ein Profil ähnlich GÖ 464 bei einem Anstellwinkel von 15° (aus Aufnahmen geschätzt) ein $c_a = 0,5$ und $c_w = 0,4$. Da der Zeitanteil der Anhaltephasen $f_1 \approx 0,4$ beträgt, errechnet sich der Auftrieb nach $\bar{A} = c_a \cdot 2F_1' \cdot q_v \cdot f_1$ zu $\bar{A}_1 = 0,0131 \text{ kp}$, der Widerstand der Stummelflügel ent-

sprechend zu $\bar{W}_1 = 0,0115 \text{ kp}$. Durch die Abschlagsphasen ist also nur noch ein $\bar{A} \approx 0,068 \text{ kp}$ aufzubringen.

Berechnete Werte für $c_a = 0,9$, $c_w = 0,03$, $\epsilon_p = 0,0333$,

$$\lambda_{0,7} = 2,22, \quad \alpha_1 = 0,0492 = 2,82^\circ,$$

$$\bar{S} = 0,0299 \text{ kp}, \quad \bar{A} = 0,067 \text{ kp},$$

$$\bar{N} = 0,550 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0073 \text{ PS},$$

$$\eta = 0,79, \quad c_s = 0,108.$$

Das Verhältnis Auftrieb:Schub muß jetzt formuliert werden

$$\frac{\bar{A}_{\text{ges}}}{\bar{S}} = \frac{\bar{A}_1 + \bar{A}}{\bar{S}} = 2,68.$$

Es ist noch der Schubbeiwert zu prüfen. Dazu bilden wir den auf die gesamte Flügelfläche (wie beim Schubbeiwert) bezogenen Widerstandsbeiwert der Anhaltephasen.

$$c_{\bar{W}_1} = \frac{\bar{W}_1 \cdot 16}{2F_1' \cdot v^2} = 0,038. \quad c_s - c_{\bar{W}_1} = 0,070.$$

Diese Differenz müßte eigentlich den Schubbeiwert (= Rumpfwiderstandsbeiwert) des Kraftfluges ohne Anhaltephasen ($\approx 0,065$) ergeben. Der Unterschied von $\approx 7\%$ kann aber wegen der begrenzten Genauigkeit der Ausgangswerte hingenommen werden.

V. Amsel, Streckenflug

Die Verhältnisse liegen hier ähnlich wie im vorigen Fall (III).

Ausgangswerte: $v = 11 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\Delta\varphi = 29^\circ$, $\varphi = 102^\circ$, $f = 0,32$.
Auch hier sind zunächst die Anhaltephasen zu berücksichtigen.

$$2F_1' = 0,0088 \text{ m}^2 \text{ (s. Abb. 26)}.$$

$$c_a = 0,5, \quad c_w = 0,4, \quad f_1 = 0,45,$$

$$\bar{A}_1 = 0,015 \text{ kp}, \quad \bar{W}_1 = 0,012 \text{ kp}.$$

Berechnete Werte für $c_a = 1,06$, $c_w = 0,08$, $\epsilon_p = 0,076$,

$$\lambda_{0,7} = 1,99, \quad \alpha_1 = 0,0694 = 3,97^\circ,$$

$$\bar{S} = 0,0277 \text{ kp}, \quad \bar{A} = 0,0730 \text{ kp}.$$

Selbst für den Maximalwert von c_a ist \bar{A} noch zu klein. Der Handflügel der Amsel besitzt jedoch wegen der gespreizten Handschwingen ein unterteiltes Profil. Solche Spaltflügel besitzen einen größeren Höchstauftrieb als ungeteilte Profile mit gleichem Gesamtumriß, jedoch auch höheren Widerstand. Es wurde eine Polare geschätzt für das „mittlere Profil“ der Amsel (s. Abb. 24) unter Berücksichtigung der Tatsache, daß $\frac{1}{5}$ der Flügelfläche unterteiltes Profil hat.

Die Rechnung wurde wiederholt mit

$$c_a = 1,1, \quad c_{w,p} = 0,1, \quad \varepsilon_p = 0,091,$$

$$\lambda_{0,7} = 1,99, \quad \alpha_1 = 0,0718 = 4,11^\circ,$$

$$S = 0,0290 \text{ kp}, \quad A = 0,0807 \text{ kp},$$

$$N = 0,525 \text{ kp m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0070 \text{ PS},$$

$$\eta = 0,63, \quad c_s = 0,131,$$

$$\frac{\bar{A}_{ges}}{S} = \frac{\bar{A}_1 + A}{S} = 3,3, \quad c\bar{w}_1 = 0,054, \quad c\bar{s} - c\bar{w}_1 = 0,077.$$



a) Abschlagstellung

b) Anhaltstellung

Abb. 26. Flugbild von *Turdus merula*

2. Vergleich und Auswertung der Flugberechnungen I bis IV

Bevor weitere Beispiele gebracht werden, ist es angezeigt, die Schubbeiwerte (c_s) und die Wahl der Profilbeiwerte (c_a und $c_{w,p}$) zu untersuchen. Für ein Flugzeug liegt der Beiwert des sogenannten schädlichen Widerstandes (Rumpf, Leitwerk usw.) bei 0,05. Die errechneten Schubbeiwerte für den unbeschleunigten Horizontalflug liegen also größenordnungsmäßig richtig. Dazu ist noch zu bedenken, daß der Widerstand des Rumpfes während des Aufschlages durch die Flügel vergrößert wird, die ja nicht völlig „verschwinden“, wie zunächst angesetzt war (s. S. 428). Wenn sie auch keinen Auftrieb liefern, so vergrößern sie doch den reinen Rumpfwiderstand. Für die Amsel ergibt sich ein höherer Rumpfwiderstand als für den Star. Das hängt wahrscheinlich damit zusammen, daß die relative Körperoberfläche bei ihr größer ist, vor allem durch den längeren und breiteren Schwanz. Allerdings kommt als Fehlerquelle hinzu, daß der Rumpfwiderstandsbeiwert nur als Differenz $c_s - c\bar{w}_1$ errechnet werden konnte, da Horizontalflug ohne „Anhalten“ wie beim Star nicht vorkommt.

Die Wahl der Luftkraftbeiwerte des Flügels (c_a und $c_{w,p}$) beim Star gründet sich auf

die Polare des gewählten Profils. Die Größe von c_a ist durch die Bedingung $|\bar{A}_{ges}| = |G|$ gegeben (s. S. 438). Der Flugzeugpropeller arbeitet am besten, wenn $\frac{c_{w,p}}{c_a} = \varepsilon_p$ seinen

kleinsten Wert hat. Bei ihm kommt es aber auf größte Schubaubeute an, und η liegt gewöhnlich zwischen 0,8 und 0,9. Der Vogelflügel hat aber außerdem Auftrieb zu liefern. Dafür ist eine „schlechtere“ Profilleitzahl ε_p günstiger (Beispiele I und II). Der Anstellwinkel wird hier kleiner gehalten, als zur Erreichung des Minimalwertes von ε_p nötig ist, und η liegt niedriger. Im „Schonflug“ (III) sind Erholungspausen vorhanden, und hier muß dann der Flügel bei jedem Abschlag größere Luftkräfte erzeugen, auch um den größer werdenden Widerstand (Anhaltphasen) zu überwinden.

Setzt man voraus, daß die durch die Flügelpolare gegebenen Werte für c_a und $c_{w,p}$ vom Vogel durch entsprechende Anstellwinkeländerungen realisiert werden können, so wäre der erforderliche Auftrieb auch zu erzielen, wenn bei gleicher Flügelfläche die Schlaggeschwindigkeit geringer ist. Dann müßte der Flügel mit großem c_a arbeiten. Allerdings würde dann die Vortriebszeugung problematisch, da $\lambda_{0,7}$ damit größer würde. Ein zweiter Weg wäre: gleiche Schlaggeschwindigkeit, aber kleinere Flügelfläche und großes c_a . Das könnte für den unbeschleunigten Horizontalflug ausreichen, aber es wäre dann schwer, plötzlich größere Luftkräfte zu erzeugen, wie sie beim Start oder beim Flug mit stark verminderter Geschwindigkeit gebraucht werden, zumal dabei die Horizontalgeschwindigkeit (v) klein ist und die Anblasgeschwindigkeit des Flügels im wesentlichen durch die Schlaggeschwindigkeit bestimmt wird, die nicht beliebig erhöht werden kann. Der Vogel verfügt also gewissermaßen über eine „Flügelflächenreserve“, indem er die geometrisch gleiche Flügelfläche im allgemeinen nicht voll einsetzt und die maximal möglichen Luftkraftbeiwerte des Flügels für besondere Fluglagen bereithält. Eine Beobachtung an Staren, die ich wiederholt gemacht habe, läßt sich so erklären. Der Vogel fliegt im raschen Horizontalflug und steigt plötzlich „in sich“ nach oben weg, d. h. ohne die Körperachse aufzurichten. Er braucht bei gleichbleibendem Schlagrhythmus nur den Anstellwinkel der Flügel etwas zu vergrößern, um diesen Effekt zu erzielen. In diesen Fällen waren keine Aufwindfelder vorhanden, die die gleiche Erscheinung hervorrufen können. So erscheint die „freie Wählbarkeit“ der c_a - und $c_{w,p}$ -Werte als Folge der Bedingung $|\bar{A}_{ges}| = |G|$ als zwangsläufig. Die Quelle von Ungenauigkeiten, wenn v , $\Delta\varphi$, φ , l und λ richtig bestimmt wurden, ist dann nur die Flügelpolare selbst, die hier aus dem Formenvergleich von Flügelquerschnitten hervorging, aber durch Windkanalmessungen natürlich genau bestimmt werden könnte.

Die Amsel (IV) fliegt offenbar nur mit maximalen c_a -Werten. Zweifellos ließen sich mit dem gleichen Flügel bei entsprechend höherer Schlaggeschwindigkeit noch größere Luftkräfte erzeugen, und im Prinzip wäre ein Schnellflug möglich, bei dem kleinere c_a -Werte genügen wie beim Star. Eine Erklärung für diesen Unterschied zwischen Star und Amsel könnte darin gesucht werden, daß die Flugmuskulatur der Amsel weniger leistungsfähig ist. Dazu kommt die andersartige „Flügelkonstruktion“⁸⁾.

⁸⁾ Auch beim Star ist zwischen den äußersten Abschnitten der Handschwingen 9 und 8 ein kleiner Schlitz ausgebildet (Abb. 20 und 25), dessen Wirkung hier vernachlässigt wurde. Die Bedeutung dieses kleinen Flügelabschnittes mit unterteiltem Profil liegt wohl darin, daß die Profiltiefe an der Flügel-

Der Amselflügel hat auf Grund seiner Teilung im distalen Abschnitt einen höheren Widerstand, liefert aber dafür bei großen Anstellwinkeln die höchste Querkraft, wo diese beim Starenflügel schon wieder absinkt, weil die Strömung abreißt. Der höhere Widerstand des Flügels führt zwangsläufig auf kleineren Schubwirkungsgrad und größeren Auftrieb. So ist dieser Flügeltyp für geringere Fluggeschwindigkeiten und kleinere Schlaggeschwindigkeiten und folglich geringere Schlagleistung am besten geeignet. (Bei größeren Vögeln findet man ein solches Paar wie Star - Amsel wieder in Taube und Krähe; auch dort finden sich die gleichen Unterschiede im Bau des Handflügels.) Ein Flügel mit geschlossener Spitze (Starentyp) wird treffend Schnellflügel (STRESEMANN 1927-1934) oder Eilflügel (STEGMANN 1962) genannt. Die gespreizten Handschwingen an einem Flügel vom Amseltyp nennt man „Vortriebsfedern“. Zweifellos dienen sie auch der Schuberzeugung. Aber die Unterteilung des Profils führt nicht nur zu größerer Querkraft, sondern auch zu höherem Widerstand. Der Schubwirkungsgrad ist geringer, die Auftriebsausbeute steigt. Das macht den Flügel zu einem „Auftriebsflügel“. Der Wirkung nach müßte man die freiwerdenden Handschwingen eigentlich als „Auftriebsfedern“ bezeichnen, wenn man als Vergleich den Schnellflügel wählt.

An dieser Stelle müssen auch die Fluggeschwindigkeiten erörtert werden. Es handelt sich immer um die Eigengeschwindigkeit des Vogels, also die Geschwindigkeit gegenüber der Luft, nicht etwa um die „Geschwindigkeit über Grund“, die vom Wind nach Stärke und Winkel mit der Flugrichtung abhängt. THIENEMANN (1930) gibt für den Star 74 km/h ($\approx 20,5 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$) auf dem Zug an, STEINBACHER (1960) nennt die Durchschnittsgeschwindigkeit mit 65-75 km/h ($18 - 21 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$), die der Amsel mit 35 km/h ($\approx 10 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$). Geschwindigkeiten um 72 km/h habe ich an einzelnen fliegenden Staren immer nur dann beobachtet, wenn der Vogel gewissermaßen „das Letzte“ hergab (z. B. beim Sich-Jagen, beim Auftauchen von Greifvögeln). Daher ist auch die besonders hohe Schwingenleistung, die größte beobachtete Schlaggeschwindigkeit und der größte beobachtete Schlagwinkel zu verstehen. Es handelt sich offenbar um kurzfristige Höchstleistungen. Die normale Schnellfluggeschwindigkeit liegt um 65 km/h bei einzeln fliegenden Vögeln. Es scheint so, als ob beim Schwarmflug ungefähr mit der Leistung des normalen Schnellfluges eine größere Geschwindigkeit erzielt wird. Es bleibt allerdings noch die Frage offen, wie sich der Flug im dichten Schwarm aerodynamisch auswirkt. SCHMITZ (1952) hat auf einen Gesichtspunkt hingewiesen: die Luft wird turbulent gemacht und dadurch verbessern sich die Strömungsverhältnisse. Gerade für kleine Vögel, die notwendigerweise mit geringer Re-Zahl fliegen müssen, ist das als Vorteil anzusehen. Die Auffassung FRANZISKETS (1951), daß beim Schwarmflug der Vorteil einer bestimmten Anordnung der den Schwarm formierenden Vögel darin liege, daß der einzelne Vogel in einer wirbelfreien Zone fliege, halte ich zumindest für den Star für unzutreffend. FRANZISKET begeht den Fehler, das Abwindgebiet hinter der starren Tragfläche eines Flugzeuges mit den Strömungsverhältnissen am Schlagflügel zu vergleichen. Auch kann man die Propellerböen eines Flugzeuges nicht mit der „Feinwirbeligkeit“ der Luft gleichsetzen, die ein kleiner schwingender Vogelflügel erzeugt.

spitze sehr klein ist und damit die Re-Zahl vermindert wird (s. S. 436), was bei ungeteiltem Profil zu schlechteren Strömungsverhältnissen führt.

STEINBACHERS Angabe über die Geschwindigkeit der Amsel ist zu niedrig, wenn man den wirklich freien Streckenflug im Auge hat. Natürlich kann sie auch wesentlich langsamer fliegen, und sie tut es vor allem beim gewandten Flug durch Gebüsch und Unterholz.

Der „Schonflug“ vom Star und der Streckenflug der Amsel verlaufen etwa unter gleichem Energieaufwand. Hier tritt die Überlegenheit des Stars als Schnellflieger deutlich hervor, allerdings ist seine Flugleistung relativ (in Beziehung zum Gewicht) größer. Die Bezeichnung „Schonflug“ ist aus zwei Gründen gerechtfertigt. Einmal beansprucht er eine erheblich geringere Leistung als der schnelle Streckenflug, dann werdender Flugmuskulatur aber vor allem längere Erholungspausen gewährt (s. Abb. 9). Es muß noch erwähnt werden, daß es beim Star eine zweite Form des langsameren Streckenfluges gibt. Er ähnelt mehr dem Flug kleiner Singvögel und ist ein schwacher „Wellenflug“, indem auf mehrere gleichmäßige Flügelschläge eine „Anhaltepause“ folgt. Leider reichte das Material nicht aus, um diese Flugform zu berechnen. Schätzungsweise liegt die Schwingenleistung ungefähr so wie bei dem geschilderten Schonflug.

3. Beschleunigter Flug und Bremsflug

Es folgt die Berechnung des Starts bei beiden Vögeln, allerdings mit Beschränkung auf den nahezu waagerechten Abflug. Der Berechnung zugrunde gelegt wurde der Flug während der zweiten Sekunde nach dem Freikommen vom Boden. Die Beschleunigung in diesem Zeitabschnitt war direkt nicht zu fassen. Es wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit während der genannten Zeit verwendet.

V. Star, waagerechter Start

Ausgangswerte: $v = 10 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\Delta\varphi = 44^\circ$, $\varphi = 132^\circ$, $f = 0,5$.

Berechnete Werte für $c_a = 1,06$, $c_{wp} = 0,08$, $\epsilon_p = 0,075$,

$\lambda_{0,7} = 1,28$, $\alpha_l = 0,0653 = 3,74^\circ$,

$\bar{S} = 0,0565 \text{ kp}$, $\bar{A} = 0,0775 \text{ kp}$,

$N = 0,757 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0101 \text{ PS}$, $\eta = 0,74$, $c_s = 0,43$.

Während des Auffliegens breitet der Vogel den Schwanz und schlägt ihn etwas nach ventral ein. Dadurch erhält der Rumpf Flügelprofilcharakter und erzeugt so Auftrieb. Dazu kommt, daß die Schlagebene etwas nach hinten geneigt ist. Das führt zu einer Vergrößerung von \bar{A} und Verkleinerung von \bar{S} . Der Gesamtauftrieb kann also mit $\approx 0,081 \text{ kp}$ angenommen werden. Dann ist $\frac{A_{\text{ges}}}{S} = 1,42$, wo-

bei \bar{S} keine Korrektur erfolgte. Näherungsweise läßt sich jetzt die durchschnittliche Beschleunigung während des Starts berechnen. Die beschleunigende Kraft ist $P = \bar{S} - \bar{W}$. \bar{S} ist der Schub während des Starts, \bar{W} ist der Gesamtwider-

Der Widerstand ist $W = Q(\epsilon_p + \alpha_1)$.

Aus W und Q ergibt sich die Resultierende $R = \sqrt{Q^2 + W^2}$ und der Winkel ϑ aus $\frac{W}{Q} = \operatorname{tg} \vartheta = \epsilon_p + \alpha_1$.

R wird zerlegt in die Umfangskraft U (Wirkungslinie in der Schlagebene) und den virtuellen Schub S_1 (senkrecht zur Schlagebene)

$$U = R \cdot \sin(\delta + \vartheta - \zeta), \quad S_1 = R \cdot \cos(\delta + \vartheta - \zeta).$$

Aus der Umfangskraft erhält man den virtuellen Auftrieb $A_1 = U \cdot \frac{2 \sin \varphi/2}{\varphi}$.

Aus A_1 und S_1 ergibt sich die Resultierende $R_1 = \sqrt{S_1^2 + A_1^2}$, die sich in den Auftrieb A und den Schub S zerlegen läßt.

$$\frac{A_1}{S_1} = \operatorname{tg} \xi, \quad A = R_1 \cdot \sin(90 - \delta + \xi),$$

$$S = R_1 \cdot \cos(90 - \delta + \xi),$$

$$\bar{A} = A \cdot f, \quad \bar{S} = S \cdot f.$$

Ausgangswerte: $v = 3 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\Delta \varphi = 43^\circ$, $\varphi = 130^\circ$, $\delta = 40^\circ$, $f = 0,5$.

Beim Bremsflug spreizt der Star die Allula ab. Damit muß man ein größeres c_a und größeres c_{w_p} annehmen, als die Polare Gö 417a zeigt.

Geschätzte Werte: $c_a = 1,1$, $c_{w_p} = 0,1$, $\epsilon_p = 0,091$.

Berechnete Werte: $\alpha_1 = 0,239$,

$$\bar{S} = 0,0202 \text{ kp}, \quad \bar{A} = 0,0718 \text{ kp},$$

$$\bar{N} = 0,291 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0039 \text{ PS},$$

$$c_s = 1,7.$$

Der Auftrieb bleibt unter dem Wert von G , auch für größere c_a - und c_{w_p} -Werte. Aber der schräg gestellte Rumpf mit dem gefächerten Schwanz liefert Auftrieb und, da bei dem großen „Anstellwinkel“ des Körpers die Strömung schon abreißt, auch beträchtlichen Widerstand. Das erklärt den hohen Schubbeiwert und läßt erwarten, daß der Gesamtauftrieb ungefähr die Größe von $G \approx 0,08 \text{ kp}$

hat. Damit erhält man $\frac{A_{\text{ges}}}{S} = 3,96$. Die Unsymmetrie des Schlagwinkels zur durch beide Schultergelenke gelegten Geraden wirkt sich auf die Größe des virtuellen Auftriebs kaum aus. Dennoch hat sie ihre Bedeutung. Der Vogel gibt „Höhensteuer“, d.h. die Schlagebene wird vordem Schwerpunktgelegt (s. Abb. 14). Dadurch sinkt der Körper hinten herunter. Dieser Drehung wirkt (im Verein mit dem gefächerten Schwanz) der erzeugte virtuelle Schub (S_1) entgegen, der im Durchschnitt bei einem Abschlager länger über der Mittelebene des Vogelkörpers als unter ihr wirkt und so ein Drehmoment hervorruft, das den Vogel nach vorn kippen will. So wird der Rumpf in seiner Schräglage gehalten.

4. Vergleich und Auswertung der Flugberechnungen V-VII

Die drei zuletzt berechneten Flugzustände haben gemeinsam; daß der Vogel hier die genannte „Flächenreserve“ voll einsetzen muß. Dabei wird der Daumenfittich als Vorflügel verwendet und die maximal erzeugbare Querkraft erhöht. (Der Star spreizt die Allula nur bei Beginn des Starts ab; im Beispiel V wurde deshalb nur mit dem maximalen c_a -Wert des „normalen“ Flügels gerechnet.) In allen drei Fällen wird zusätzlicher Auftrieb gebraucht. Dazu verwendet der Vogel die „Steuerfedern“. Diese Bezeichnung für den Schwanz ist hier recht unzutreffend, denn seine Hauptaufgabe besteht wahrscheinlich eben darin, in besonderen Fluglagen als „Hochauftriebsmittel“ (VON HOLST) zu wirken.

Eine größere Unsicherheit wird in die Rechnung dadurch hineingetragen, daß die Luftkraftbeiwerte nicht mehr durch die gewählte Polare gegeben sind, sondern auf Grund der Versuchsergebnisse an Tragflügeln (Ergebnisse der aerodynamischen Versuchsanstalt, Liefg. II) angenommen werden mußten. Dazu kommt im Fall VII, daß auch α_1 nur ungefähr bestimmt werden konnte. Deswegen wird man die Beispiele V-VII weit stärker als die Fälle I-IV nur als eine gröbere Schätzung der Luftkräfte werten können. Immerhin geben die durchgerechneten Beispiele einen Einblick in die Flugtechnik der Vögel und lassen einen Vergleich zu.

Interessant ist der Start von Star und Amsel (V und VI). Letztere erzielt mit ihrem Auftriebsflügel bei hoher Schlaggeschwindigkeit etwa die gleiche Beschleunigung wie der Star – wahrscheinlich eine etwas größere – und erreicht schneller als der Star ihre normale Fluggeschwindigkeit, die allerdings niedriger liegt. Bereits LORENZ (1933) hat darauf hingewiesen, daß Flügel mit gespreizten Handschwingen den Vogel zu einem raschen Abflug befähigen. Weiter ersieht man, daß es für den Vogel beim Start vor allem darauf ankommt, den nötigen Auftrieb zu erzielen. Der Vortrieb fällt gewissermaßen nebenbei ab. Das ist nur so zu erreichen, daß die Flügel dann nicht auf größten Schub (ϵ_p wird ein Minimum), sondern auf größtmögliche Querkrafterzeugung (c_a muß seinen Höchstwert erreichen) arbeiten, was gleichbedeutend mit größerem Flügelerwiderstand, relativ größerer Umfangskraft und somit größerem Auftrieb ist. Die Flügel müssen unter großem Anstellwinkel angeblasen werden, ganz im Gegensatz zur Verstellluftschraube des Flugzeugs, wo der Anblasewinkel beim Start so klein gewählt wird, daß die Schubausbeute maximal und die Umfangskraft möglichst klein wird.

Der Flug auf der Stelle, der zur Schätzung des induzierten Winkels beim Bremsflug des Stars angeführt wurde, wird von diesem Vogel in der reinen Form, wie man ihn bei Rotschwänzen, Fliegenschnäppern usw. findet, nicht ausgeführt. Der geschilderte Bremsflug tritt in ganz ähnlicher Weise während der Landung kurz vor dem Aufsetzen regelmäßig auf, und eine ähnliche Flugform spielt beim Nahrungserwerb eine Rolle. Der Star betreibt die Flugjagd auf Insekten zuweilen sehr ausdauernd. Er fliegt im langsamen Gleitflug und schaltet immer wieder Kraftflugphasen ein. Seine Geschwindigkeit ist etwas größer als beim eigentlichen Bremsflug, aber die charakteristische Haltung (Körper aufgerichtet, Schwanz gefächert) ist ganz ähnlich. Daß man beim Star kaum einen wirklichen „Flug auf der Stelle“ beobachten kann, hängt wahrscheinlich damit zusammen, daß er zu schwer ist. Ein Nektarvogel. Rotschwanz oder Fliegen-

schnäpper (s. ZIMMER 1943, OEHME 1959) fliegt ohne Mühe am Ort, obwohl die Flugbewegung im Prinzip die gleiche ist wie beim Star: der Aufschlag liefert keine Querkraft. Der Star ist aber rund fünfmal so schwer wie ein Rotschwanz. Größere Vögel (z. B. Falken, Möwen, Tauben) gehen, wenn sie auf der Stelle fliegen, zum „Rütteln“ über, d. h. im Aufschlag wird die Hand so weit supiniert, daß der Flügel mit „verkehrtem Profil“ angeblasen wird. So kann sich der Vogel gewissermaßen an die im *Ab- und Aufschlag* erzeugte Luftkraft hängen. Wir finden aber beim Star keinen Rüttelaufschlag. Beim Bremsflug ist eine Horizontalgeschwindigkeit vorhanden, und der Körper wirkt als Auftriebserzeuger (s. S. 448), so daß der erforderliche Gesamtauftrieb noch erreicht wird. Wird aber die Horizontalgeschwindigkeit gleich Null, so reicht die Flügelfläche des Stars offenbar nicht mehr aus, um den Vogel mit der Flügelform des Trillerfluges in der Luft zu halten. Seine Flächenbelastung beträgt $3,9 \text{ kp/m}^2$, die eines Gartenrotschwanzes aber weniger als die Hälfte davon ($\approx 1,6 \text{ kp/m}^2$)! Die hier erörterten Gesichtspunkte sind auch bei der Amsel zu berücksichtigen, denn auch sie übertrifft die kleinen Trillerflieger im Gewicht um das Fünffache, und die Flächenbelastung ist mit $\approx 3,3 \text{ kp/m}^2$ zu hoch.

Die Amsel ist zwar auch imstande, langsam zu fliegen, was ihr besonders beim Flug durch Unterholz und Gebüsch zustatten kommt, aber sie verfährt dabei anders als der Star im Bremsflug. Leider ließ sich diese Flugform nicht filmen, so daß nur eine Beschreibung möglich ist. Als Hochauftriebsmittel werden wieder die Steuerfedern verwendet. Dann sieht man aber bei kleinen Geschwindigkeiten auch, daß der Flügel während des Aufschlages wie bei großen Vögeln entfaltet bleibt und so als Auftriebs-erzeuger wirkt. Der Schlagwinkel ist auffallend klein (80° – 90°).

Tabelle 4

Flugzustand	v (m · sec ⁻¹)	φ (°)	Ab- schläge pro sec	ω (sec ⁻¹)	u (m · sec ⁻¹)	λ	$\frac{A_{ges}}{S}$	c _s	η	\bar{N} (kp m · sec ⁻¹)
schneller Hori- zontalflug	18	100	13	55,85	10,12	1,78	2,92	0,066	0,76	0,666
Horizontalflug mit Höchst- geschwindigkeit	20	141	11	65,60	11,88	1,68	2,45	0,064	0,75	0,890
Schonflug	14,5	130	7 bis 8	51,5	9,33	1,55	2,68	0,108	0,79	0,550
Start b = 5,9 m · sec ⁻¹	10 ¹⁾	132	13 bis 14	61,5	11,15	0,90	1,42	0,430	0,74	0,757
Bremsflug	3	130	14 bis 15	60,0	10,88	— ²⁾	3,96	1,700	— ²⁾	0,291
Streckenflug	11	102	7	40,5	7,88	1,40	3,30	0,131	0,63	0,525
Start b = 6,1 m · sec ⁻¹	8 ¹⁾	140	11 bis 12	55,9	10,09	0,73	1,40	0,580	0,64	0,850

¹⁾ Durchschnittsgeschwindigkeit in der zweiten Sekunde nach dem Abheben (s. Text)

²⁾ Fortschrittsgrad und Schubwirkungsgrad sind nicht zu berechnen, da die Flügelschlagenebene nicht senkrecht zur Flugrichtung steht.

5. Zusammenstellung der wichtigsten Daten der berechneten Kraftflugformen

Die Tabelle 4 enthält an unmittelbar zugänglichen Größen die Fluggeschwindigkeit v , den Schlagwinkel φ und die Zahl der Abschlüge pro Sekunde (der Ausdruck „Schlagfrequenz“ wurde vermieden, da ja auch unregelmäßige Schlagfolgen auftreten); ferner an unmittelbar zu errechnenden Größen die Winkelgeschwindigkeit des

Flügels (ω), die Umfangsgeschwindigkeit (u) und den Fortschrittsgrad ($\lambda = \frac{v}{u}$).

Zwischen u bzw. λ und den in den Rechnungen verwendeten Größen $u_{0,7}$ und $\lambda_{0,7}$ bestehen die einfachen Beziehungen $u_{0,7} = 0,7 u$ und $\lambda_{0,7} = \frac{\lambda}{0,7}$. Schließlich sind die aus den Luftkraftberechnungen hergeleiteten charakteristischen Werte aufgeführt: das Verhältnis Auftrieb: Schub ($\frac{A_{ges}}{S}$), der Schubbeiwert (c_s), der Schubwirkungsgrad (η) und die Schwingenleistung (\bar{N}).

Diskussion

Eine Wertung der durchgeführten Flugberechnungen muß zwei Gesichtspunkte berücksichtigen: das Verfahren selbst und den Aussagewert der Befunde.

Bei der Darstellung des Rechenverfahrens und bei der Erörterung der Ergebnisse ist bereits auf Unsicherheitsfaktoren hingewiesen worden. Es können nach diesem Verfahren nur Näherungslösungen erhalten werden, denn schon die Bestimmung der Ausgangswerte konnte nur Durchschnittswerte für die einzelnen Flugzustände erbringen. Durchgerechnet wurden dann auch nur solche Fälle, für die genügend Ausgangswerte vorlagen, denn das fliegerische Repertoire von Star und Amsel ist natürlich durch die vorgeführten Beispiele keineswegs vollständig dargestellt. Andererseits handelt es sich durchweg um Freilandbeobachtungen, so daß man sicher sein kann, den Flug unter natürlichen Bedingungen darzustellen.

Die Lösungen bauen sich auf einem Verfahren zur Berechnung von Luftschrauben auf und können die Feinheiten der Flügelform nicht berücksichtigen. Die Rechnung gilt ja zunächst nur für einen sich kontinuierlich drehenden Propeller, während am Flügel zu Beginn und am Ende des Abschlages nicht die „normalen“ Strömungsverhältnisse des Propellerblattes herrschen. Dann wird die schwache Krümmung der Schlegebene nicht berücksichtigt. Auch reicht die Zeitdehnung der Filme nicht aus, um mögliche Änderungen der Winkelgeschwindigkeit des Flügels während des Abschlages zu ermitteln. Die Vernachlässigung dieser Feinheiten bringt aber keinen grundsätzlichen Fehler in die Rechnung.

Die größte Unsicherheit sind die Luftkraftbeiwerte (c_a und c_{wp}). Hier konnte man nur durch Formvergleich und Berücksichtigung der durch die Meßwerte gegebenen Flugbedingungen nach den Erfahrungen der Aerodynamik mögliche Werte annehmen. Prinzipiell wäre eine experimentelle Ermittlung der Flügelpolaren möglich, da sich von den Flügeln ohne weiteres Modelle für die Untersuchung im Windkanal her-

stellen ließen. Die praktische Durchführung erfordert aber ziemlichen Aufwand. Am günstigsten wäre folgender Weg: Es müßten zweiflügelige Propeller aus den Vogel- flügelmodellen hergestellt werden. Im Windkanal mißt man den Schub dieser Propeller für die in Frage kommenden Winkelgeschwindigkeiten (das sind ca. 350 bis 700 Umdrehungen pro Minute) bei verschiedenen Steigungen der Propellerblätter und verschiedene Anblasgeschwindigkeiten (etwa im Bereich $v = 0$ bis $20 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$). Die Größe der jeweiligen Umfangskraft läßt sich berechnen. Auch erhielte man aus den gemessenen und errechneten Werten die Polaren der Flügel. Ein Restfehler wäre aber auch so nicht auszumergen, da die elastische Verformung des Flügels im Abschlag nicht miterfaßt werden kann.

So wird man von den Rechnungsbeispielen nicht erwarten, daß sie absolut genaue Werte liefern. Man kann jedoch annehmen, daß die ermittelten Größen die einzelnen Kraftflugformen hinreichend charakterisieren.

Das Gewicht als Kontrolle für den Auftrieb ist bereits behandelt worden. Die Widerstandsbeiwerte für den Rumpfwiderstand liegen ebenfalls in einem Bereich, der nach den Erfahrungen der Flugtechnik als normal anzusehen ist. Sie stimmen auch, aus verschiedenen Flugzuständen gerechnet, gut überein und sprechen für die Brauchbarkeit der Berechnungen. Die Schwingenleistung (= Flugleistung des Vogels) bietet eine weitere Vergleichs- und Kontrollmöglichkeit. Als Leistungsbelastung bezeichnet man den Quotienten aus Gewicht in kp und Motorleistung in PS. Die größte festgestellte Leistung ist beim Star 0,0118 PS, bei der Amsel 0,0113 PS. Daraus ergeben sich die Leistungsbelastungen für den Star mit 6,9 kp/PS, für die Amsel mit 8,5 kp/PS. Auch hier wird wahrscheinlich gemacht, daß der Star einen relativ stärkeren „Flugmotor“ als die Amsel hat. Die Leistungsbelastung der beiden Vögel lohnt einen Vergleich mit dem Flugzeug. Dabei ist jedoch die absolute Größe der „Flugmaschine“ zu berücksichtigen. Verhalten sich die Längenmaße von Vogel und Flugzeug (z. B. die

Flügelänge l) wie $\frac{l_v}{l_f} = \alpha$, so verhalten sich die Gewichte wie α^3 und die Leistungsbelastungen wie $\alpha^{-\frac{1}{2}}$. Nehmen wir ein Flugzeug mit $\approx 11 \text{ m}$ Spannweite und $l_f = 5 \text{ m}$ an, die Flügelänge des Vogels mit $l_v = 0,2 \text{ m}$, so entspräche einem Körpergewicht des Vogels von $\approx 90 \text{ p}$ ein Flugzeuggewicht von $\approx 1,4 \text{ t}$. Einer Leistungsbelastung des Vogels von 7,5 kp/PS entsprechen dann 1,5 kp/PS. Der Vogel hat also einen relativ sehr starken Flugmotor. (Die im Flugzeugbau gebräuchlichen Werte für „konventionelle“ Flugzeuge liegen zwischen 3–8 kp/PS.) Der Wert für das „Vergleichsflugzeug“ liegt nicht weit von dem, welchen VON HOLST und KÜCHEMANN (1941) für das von ihnen ausgewertete Schwingenflugmodell fanden (1 kp/PS).

Noch eine weitere Kontrollmöglichkeit liegt in den errechneten Schwingenleistungen. Man kann nachprüfen, ob sie physiologisch möglich sind. Im Schnellflug ($v = 65 \text{ km/h}$) beträgt die Flugleistung des Stars $0,666 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$. (Es wird allerdings der Flügelabschlag vernachlässigt, die dabei aufzuwendende Arbeit ist jedoch sehr klein gegenüber der des Abschlages.) In einer Stunde leistet der Vogel demnach eine Arbeit von $\approx 2400 \text{ kp} \cdot \text{m}$. Setzt man den Wirkungsgrad der Flugmuskulatur mit 25% an, so ist der Energiebedarf für eine Stunde $9600 \text{ kp} \cdot \text{m} \approx 22,5 \text{ kcal}$. Geht man von einer Tagesleistung von 250 km aus – die täglich zurückgelegten Strecken während

der Zugzeit liegen meist niedriger (s. CREUTZ 1952, SCHÜZ 1952, STEINBACHER 1951) – so sind das bei der Geschwindigkeit von 65 km/h (ohne Berücksichtigung des Windes) rund 3,9 Stunden Flugzeit. Der Energiebedarf ist 88 kcal. Nach GROEBBELS (1932) fraß ein gekäfigter Star täglich $\approx 23,2 \text{ p}$ Mehlwürmer, das entspricht $\approx 55 \text{ kcal}$ und kann als Deckung für Grundumsatz und Leistungszuwachs ohne Fliegen angesetzt werden. Danach betrüge der Gesamtenergiebedarf pro Tag $\approx 143 \text{ kcal}$. Um diesen Bedarf zu decken, muß der Vogel rund 60 p Nahrung zu sich nehmen, wenn man den Kaloriengehalt der Mehlwürmer ($1 \text{ p} \approx 2,4 \text{ kcal}$) zugrunde legt. Gehen wir vom Schonflug aus ($v = 52 \text{ km/h}$), so ergibt sich folgendes: Flugleistung $0,55 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$. Arbeit in einer Stunde 1980 kp m. Energiebedarf pro Stunde $\approx 18,6 \text{ kcal}$. Angenommene Tagesleistung in der Zeit der Jungenaufzucht 200 km. Flugzeit 3,9 Stunden. Energiebedarf $\approx 72,5 \text{ kcal}$. Gesamtenergiebedarf $\approx 127,5 \text{ kcal}$ pro Tag. Nahrungsbedarf $\approx 53 \text{ p}$. Für die Amsel findet man in einer ähnlichen Rechnung: Schwingenleistung im Streckenflug ($v = 40 \text{ km/h}$) $0,525 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$. Arbeit in einer Stunde $\approx 1890 \text{ kp} \cdot \text{m}$. Energiebedarf pro Stunde $\approx 17,7 \text{ kcal}$. Angenommene Streckenleistung pro Tag 150 km. Flugzeit $\approx 3,8$ Stunden. Energiebedarf $\approx 67,4 \text{ kcal}$. Eine gekäfigte Amsel fraß täglich 20,8 p Mehlwürmer (GROEBBELS 1932), das sind für Grundumsatz + Leistungszuwachs ohne Fliegen $\approx 49 \text{ kcal}$ pro Tag. Der Gesamtenergiebedarf beträgt dann $116,5 \text{ kcal}$ pro Tag, der Nahrungsbedarf (auf „Mehlwurmbasis“ berechnet) $\approx 49 \text{ p}$. Dieser überschlägig geschätzte Nahrungsbedarf der Vögel erscheint glaubhaft. SCHILDMACHER (1952) führt an, daß gekäfigte Gartenrotschwänze täglich 114% ihres Körpergewichts an Nahrung aufnehmen, wobei es sich allerdings um Weichfutter mit geringerem Kaloriengehalt handelte. Eine von mir gehaltene Amsel fraß täglich zwischen 35 p und 90 p Weichfutter. Das heißt aber, daß die Vögel prinzipiell in der Lage sind, die zur Deckung der Flugenergie erforderliche Nahrungsmenge aufzunehmen. Diese Feststellung spricht damit auch für die Brauchbarkeit der errechneten Schwingenleistungen.

Es ist noch zu untersuchen, welche Aufschlüsse die Berechnungen über das Flugvermögen der beiden Vögel geben. Zunächst zeigt sich, daß man den Kraftflug nicht nach einer gemessenen oder errechneten Kenngröße erschöpfend beurteilen kann. Der Fortschrittsgrad ändert sich im allgemeinen gleichsinnig mit der Geschwindigkeit, doch gibt es Ausnahmen. Man wird feststellen müssen, ob das Überschreiten einer bestimmten Geschwindigkeit beim Streckenflug und der Übergang zur Höchstleistung auch bei anderen Arten zu einer Verkleinerung von λ führt. Die Größe des Schlagwinkels ist für die Charakterisierung des Flugzustandes nicht geeignet, da sie nicht einer bestimmten Geschwindigkeit zugeordnet ist. Dagegen kann man den Flug nach der Schwingenleistung kennzeichnen. Dabei zeigt sich übereinstimmend, daß der Abflug dem Vogel die größte Anstrengung abverlangt, wenn man von anderen kurzfristigen Höchstleistungen absieht. Die Leistungsbelastung ist bei dem Schnellflieger Star in vergleichbaren Flugzuständen höher als bei der langsameren Amsel. Das meiste über die Flugeigenschaften sagen aus: Der Schubwirkungsgrad, das Verhältnis Auftrieb: Schub und der Schubbeiwert. Ein hoher Wert von γ ist charakteristisch für den spitzen Schnellflügel, geringer Schubwirkungsgrad kennzeichnet den mit „Vortriebsfedern“ ausgestatteten runden Flügel. Das Verhältnis Auftrieb: Schub ist bei ungefähr gleichschweren Vögeln bei dem schneller fliegenden kleiner. Der Schubbeiwert

(\cong Rumpfwiderstandsbeiwert) kennzeichnet die Gestalt des Vogels. Niedriger Wert von c_3 weist auf bessere aerodynamische Formgebung hin und findet sich ebenfalls bei dem Schnellflieger.

Diese Schlußfolgerungen gelten zunächst für die beiden hier untersuchten Arten, und es wäre nötig, weitere Vögel mit recht verschiedener Flugweise in der gleichen Art zu untersuchen. Dazu ist festzustellen, wie weit das hier vorgeführte Rechenverfahren allgemein anwendbar ist. Da die Berechnung sich nur auf die Erfassung des Flügelabschlages erstreckt, kann in der gleichen Weise der Flug solcher Vögel dargestellt werden, deren Flügelaufschlag genauso verläuft wie bei Star und Amsel. Das ist bei vielen kleinen Vögeln der Fall. Allerdings wird die Berechnung erschwert, wenn ein Wellenflug vorliegt, weil die Kraftflughasen dann mehr oder weniger ausgeprägte kurze Steigflüge sind. Dort, wo der Aufschlag aber zur Auftriebserzeugung dient wie bei großen Vögeln oder wo ein vortriebserzeugender Rüttelaufschlag auftritt, ist die Berechnung in so einfacher Weise nicht zu bewerkstelligen. Sie ist aber durchführbar, wenn der Widerstandsbeiwert des Vogels experimentell bestimmt wird und damit der zu erzeugende Schub feststeht. Die vorgeführten Beispiele sollen zunächst zeigen, daß eine quantitative Darstellung des Vogelfluges möglich ist. Es ist allerdings nötig, die Berechnungen soweit wie möglich von unsicheren Ausgangswerten zu entlasten und vor allem die Flügelpolaren experimentell zu bestimmen.

Teil 2: Die Flugorgane und Schriftenverzeichnis folgen in Heft 5.

Anschrift des Verfassers: DR. HANS OEHME, Zoologische Forschungsstelle im Berliner Tierpark, Berlin-Friedrichsfelde, Am Tierpark 41.