

Sonderdruck aus: Die Vogelwelt, 89. Jahrgang, Heft 1/2 (1968)

Copyright 2007 Aula-Verlag Wiebelsheim, Germany

Aus der Zoologischen Forschungsstelle der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin im Berliner Tierpark (Direktor: Prof. Dr. H. Dathé)

Der Kraftflug der Vögel

(Möglichkeiten der aerodynamischen Kennzeichnung — Fragen
der Terminologie)

Von Hans Oehme

(Mit 13 Abbildungen*)

Leistungsaufwand u. a. mehr, wie ich sie schon versucht habe (Oehm'e 1963, 1965 b), schein lediglich um die Frage: Wie werden die Flügel während des Schlagzyklus angeblasen, und in welcher Richtung wirken die dabei erzeugten Luftkräfte?

Nun existieren aber für bestimmte Flugformen bereits Termini technici. Sie bereiten zum Teil Schwierigkeiten, weil durch das gleiche Wort verschiedene Definitionen repräsentiert werden. Diese können allgemein sein oder auch sehr bestimmte Aussagen über das Kräftespiel des Flügelschlags machen. Nicht immer ist es aber klar, in welcher Bedeutung das Wort im Einzelfall angewandt wird. Andere Begriffe sind von vorneherein falsch und müßten durch bessere ersetzt werden. So wird es nicht verfehlt sein zu prüfen, ob man nicht zu einer einheitlichen Bestimmung der den Kraftflug der Vögel betreffenden Begriffe gelangen kann.

Meß- und Darstellungsverfahren

Die Anströmung des Flügels resultiert aus zwei Bewegungen: der Be wegung des Flügels gegenüber dem Vogelkörper (Schlaggeschwindigkeit) und der Bewegung des Vogels gegen die umgebende Luft (Fluggeschwindigkeit). Zur Analyse der Schlagbewegung braucht man Zeitlupenfilme mit einer genügend hohen Bildfrequenz, die eine ausreichende zeitliche Auflösung der Bewegung gestattet. Die Fluggeschwindigkeit kann man auf verschiedene Weise bestimmen. Am besten ist es, die Analyse der Flügelmovement (Zeitlupenaufnahmen) und die Messung der Fluggeschwindigkeit an einem Tier zu gleicher Zeit durchzuführen. Bei Untersuchungen des Insektenfluges haben Weiss-Fogg (1956), Jensen (1956) und Nachtag (1966) Ergebnisse hoher Präzision erhalten, indem sie den freien Flug im Windkanal simulierten. Die gleiche Methode hat Greenewalt (1960) beim Rubinkehlkolibri erfolgreich angewandt. Bei frei fliegenden Tieren muß man sich mit weniger genauen Verfahren behelfen. Die Fluggeschwindigkeiten lassen sich bei Windstille mit Stoppuhr und Meßband feststellen; auch läßt sich bei geradlinig durchflogenen größeren Entfernungen die „Geschwindigkeit über Grund“ bestimmen und daraus unter Berücksichtigung von Windrichtung und -stärke die Fluggeschwindigkeit ermitteln (Thiemann 1930), aber die Genauigkeit ist dabei weiter gemindert. Schließlich gelingt es auch nur selten, die Geschwindigkeitsbestimmung und die Bewegungsanalyse zur gleichen Zeit am selben Tier vorzunehmen, so daß man aus zahlreichen Messungen des ungefähr gleichen Flugzustandes Durchschnittswerte gewinnen muß, mit denen man weiter arbeitet (vgl. Oehm'e 1963).

Einleitung

Wir unterscheiden zwei Hauptformen des Fluges: das Fliegen ohne Flügelschlag (Gleit- und Segelflug) und das Fliegen mit Flügelschlag (Kraftflug). Nur von letzterem soll die Rede sein. Zum Verständnis verschiedener Typen des Kraftfluges gelangen wir, wenn wir ihre aerodynamischen Besonderheiten herausarbeiten. Es geht dabei hier nicht um eine mehr oder weniger genaue Berechnung der vom Vogel erzeugten Luftkräfte, den

* Die Illustration besorgte der wissenschaftliche Graphiker der Zoologischen Forschungsstelle, Herr Reiner Ziegler.

Um auf Grund der Geschwindigkeitsmessungen (auch durch die Auswertung der Zeitlupenaufnahmen der Flügelbewegungen wird eine Geschwindigkeit bestimmt: die Schlaggeschwindigkeit des Flügels) zu Aussagen über Luftkräfte zu kommen, bedarf es einer eindeutigen Darstellungswweise. Wir verwenden dazu ähnlich, wie es in der Flugtechnik üblich ist, rechtwinklige Koordinatensysteme im dreidimensionalen Raum.

die sich durch Drehungen um die Achsen ineinander überführen lassen (vgl. hierzu Pröl 1951, Richter 1959, Normblatt DIN L 100). Legt man den Schnittpunkt des Achsenkreuzes in die Mitte der Verbindungsline zwischen beiden Schultergelenken, so sind die Achsen beim tierfesten Koordinatensystem die Rumpfachsen des Vogels: x , positiv nach vorn; y , Längsachse; z , positiv nach rechts, Querachse = Verbindungsline der Schultergelenke; z_a positiv nach unten, Hochachse. Durch die Achsen werden drei Ebenen bestimmt: x , z = Sagittalebene; x , y = Frontalebene; y , z = Transversalebene. Beim flugwindfesten System (Index a) ist die positive x_a -Achse durch die Bewegungsrichtung des Vogels festgelegt. Die Verhältnisse werden dadurch vereinfacht, daß wir nur solche Flugvorgänge berücksichtigen, wo y_a mit y zusammenfällt (Abb. 1). Das bedeutet, daß die Ebenen x , z und x_a , z_a identisch sind. Ist der Winkel zwischen x und x_a (α) gegeben, so legt die Richtung einer Bewegung gegen die Längsachse (x_a) fest. Es gibt noch ein drittes Koordinatensystem, welches durch die Orientierung der positiven z -Achse bestimmt ist (geoklines System, Index g). Sie fällt mit der Wirkungslinie der Schwerkraft zusammen (z_g). Es bleibt auch hier festgelegt, daß y_g mit y_a und y identisch ist. Ist der Winkel zwischen x_a und x_g (γ) bekannt, so bestimmt die Richtung einer Bewegung gegen x_g auch deren Richtung ge-

gen x_a (und, wenn bekannt ist, auch gegen x). Bei horizontalem Flug fällt das flugwindfeste mit dem geoklinen System zusammen ($\gamma = 0$).

Die Flügel überstreichen (im tierfesten System dargestellt) bei ihren Bewegungen schwach gekrümmte Flächen. Es bedeutet keinen grundsätzlichen Fehler, wenn man diese durch Ebenen ersetzt, um deren Winkel mit der x_a -Achse zu bestimmen. Die Winkelgeschwindigkeit einer Schlag-

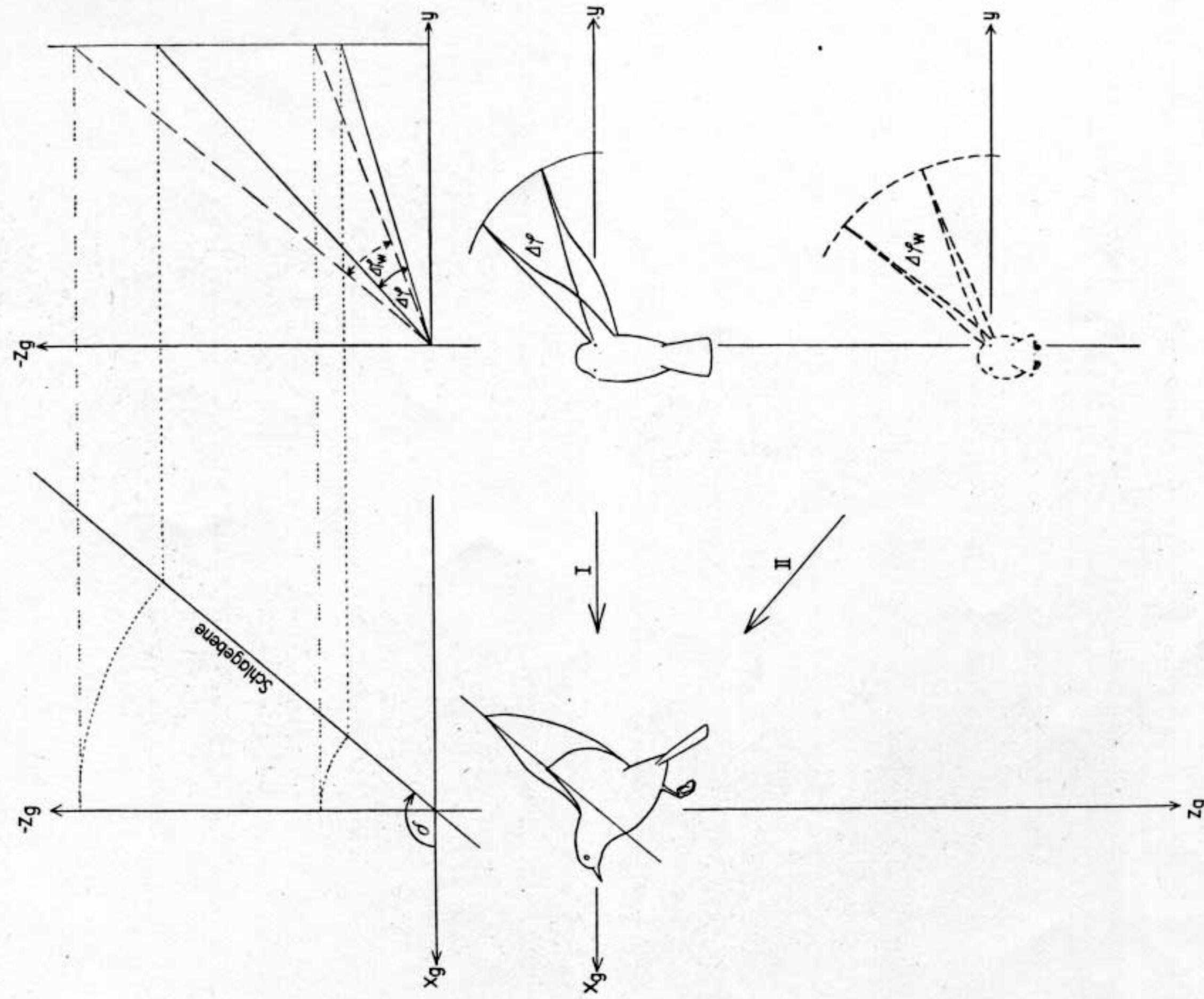


Abb. 2. Zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit des Flügels, Prinzip der Feststellung der wahren Winkelgröße. Aufnahmerichtung senkrecht zur Schlagebene (II) ergäbe unmittelbar den wahren Winkel ($\Delta \varphi_w$), Aufnahmerichtung schräg zur Schlagebene (I) ergibt den verzerrten Winkel ($\Delta \varphi$), der auf die wahre Größe umgerechnet werden muß. Oben sind die geometrischen Beziehungen zwischen $\Delta \varphi$ und $\Delta \varphi_w$ dargestellt

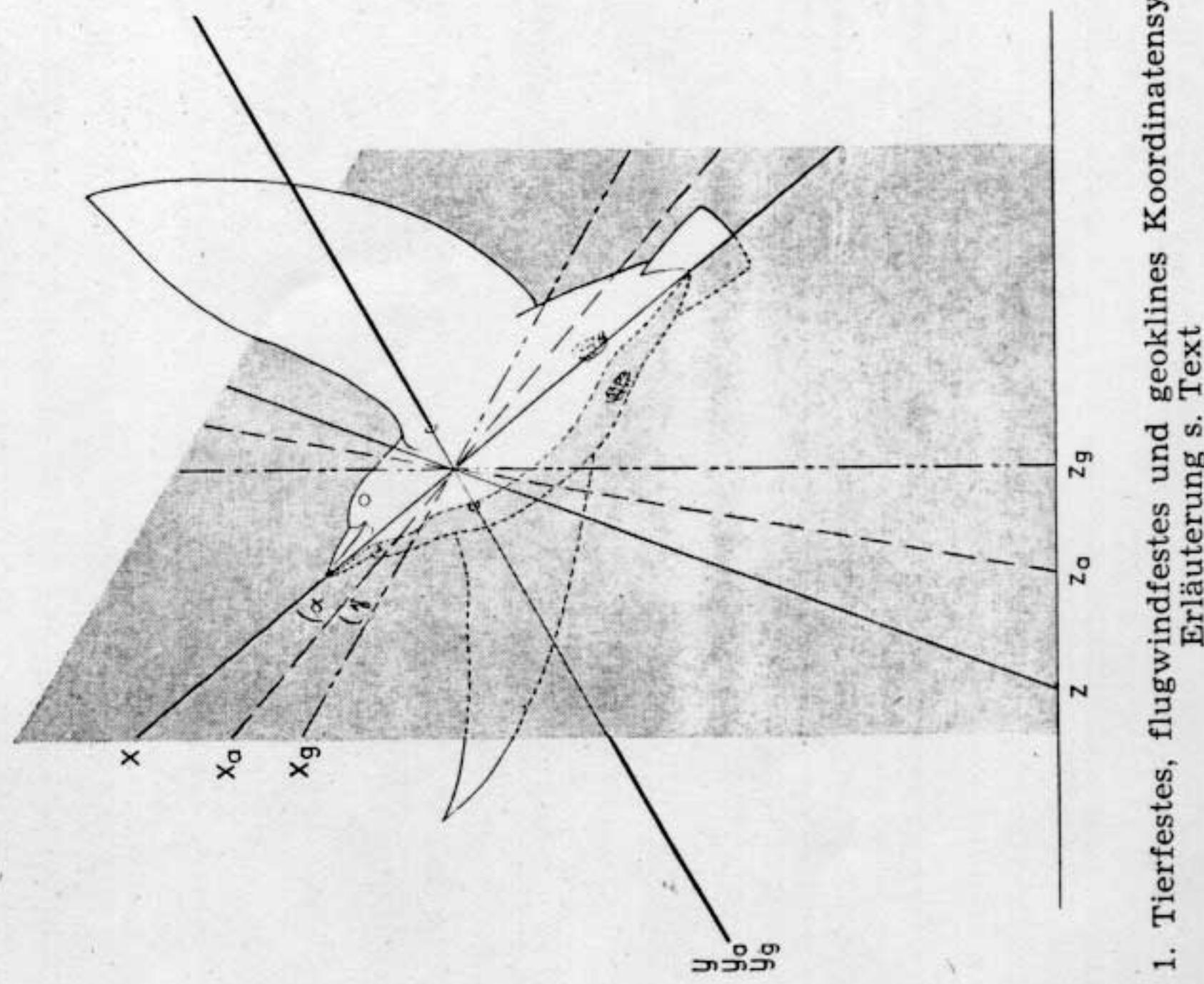


Abb. 1. Tierfestes, flugwindfestes und geoklines Koordinatensystem. Erläuterung s. Text

sten ist die Wölbung an den rumpfnahen Flügelteilen, am schwächsten an der Flügelseite (Oehme 1963, 1965 b; Nachrigall 1966 b). Die Gerade, die die tiefsten Punkte der konkaven Profilseite verbindet, heißt Profilschne. Die Anblasrichtung bildet mit ihr den aerodynamischen Anstellwinkel (α_a). Er kann positiv oder negativ sein. Im Bereich positiver Anstellwinkel (Abb. 4 a) entsteht senkrecht zur Anblasrichtung nach der

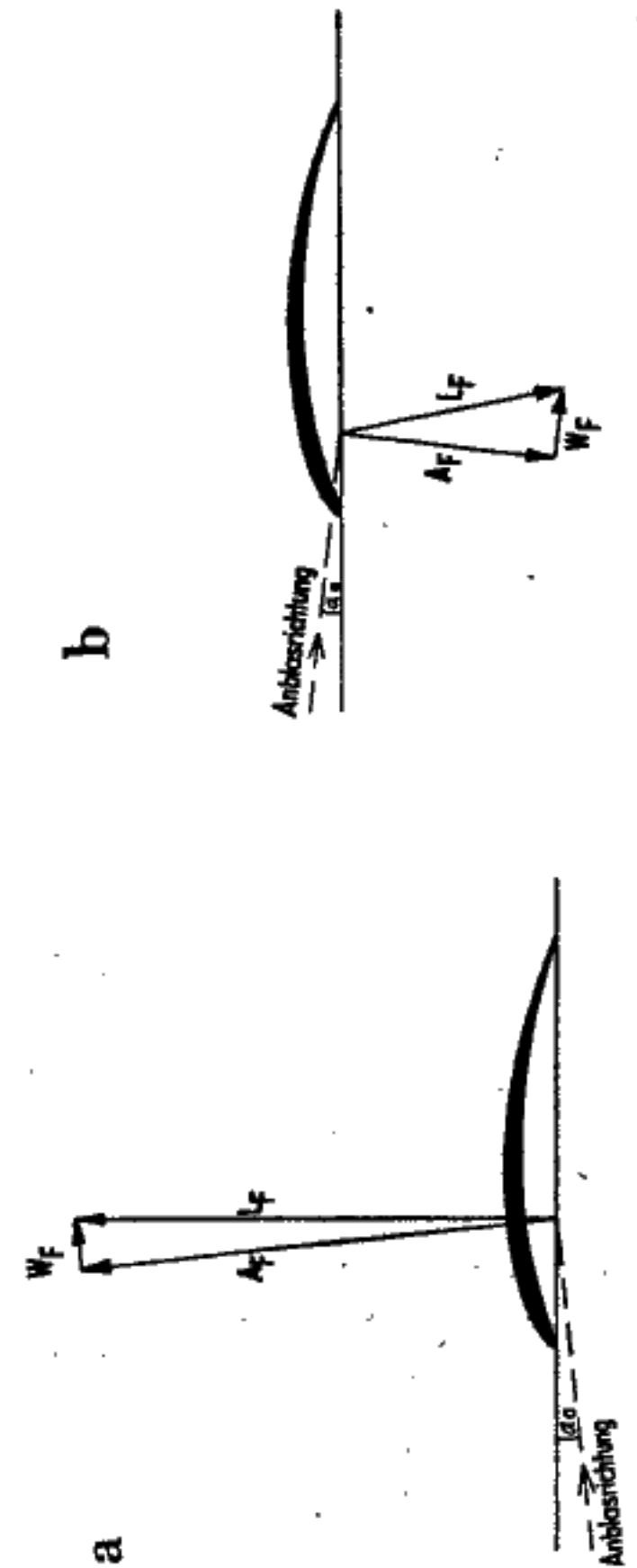


Abb. 4. Luftkräfte am Flügelprofil bei positivem (a) und negativem (b) Anstellwinkel α_a . AF Flügelauftrieb oder aerodynamische Querkraft, W_F Flügelwiderstand, L_F resultierende Luftkraft, α_a aerodynamischer Anstellwinkel

gewölbten Seite hin die aerodynamische Querkraft oder der Flügelauftrieb (AF), in der Anblasrichtung wirkt der Flügelwiderstand (W_F), aus beiden resultiert die Gesamtluftkraft (L_F). Wächst der Anstellwinkel von Null ausgehend, so wird der Flügelauftrieb bei gleichbleibender Anblausgeschwindigkeit rasch größer. Auch der Flügelwiderstand wächst, aber das Verhältnis W_F/AF bleibt annähernd gleich (für ein Profil wie das der Abb. 4 bei einer Flügelstreckung [Spannweite: Flügeltiefe] 5 : 1 bis 6 : 1 etwa $1/10$), sofern α_a nicht größer als 10° wird. Wächst der Anstellwinkel weiter, so steigt AF noch etwas an, aber W_F nimmt jetzt rasch zu, und das Verhältnis W_F/AF wird immer größer, zumal etwa ab $\alpha_a = 15^\circ$ AF wieder sinkt. Der günstige Anstellwinkelbereich (= kleiner Wert W_F/AF) liegt zwischen 3° und 10° . Aber auch bei $\alpha_a = 0$ wird noch ein geringer Flügelauftrieb nach der Oberseite zu erzeugt, während W_F sich kaum ändert (gegenüber $\alpha_a = 3^\circ$). Erst wenn der Anstellwinkel etwa -3° beträgt, wird $AF = 0$, und nur der (absolut kleine) Flügelwiderstand bleibt. Wird α_a noch kleiner, so kehren sich die Verhältnisse am Flügel um (Abb. 4 b): Der Flügelauftrieb entsteht in Richtung zur morphologischen Unterseite hin. Das Verhältnis W_F/AF ist aber ungünstiger als bei „normaler“ Anströmung (etwa $1/3$, im Bereich bis $\alpha_a = -10^\circ$). Bei höher gewölbten Profilen, wie sie z. B. im Armfügel auftreten, muß α_a stärker negativ werden, damit der Flügelauftrieb verschwindet. Bei schwach oder nicht gewölbten Platten (Spitzenteil des Flügels) erfolgt die funktionelle Umkehr schon bei ganz kleinen negativen Anstellwinkeln, wobei dann auch der Wert von W_F/AF nicht sehr verschieden von dem bei positivem Anstellwinkel ist (Langen & Seifert 1935, Flachsbarth 1932, Schmitz 1952). Wir wollen

bewegung ermittelt man, indem man feststellt, welchen Winkel γ in der Schlagebene ($\Delta\varphi_w$) der Flügel in einer bestimmten Zeit überstellt (z. B. Zeitintervall zwischen zwei aufeinander folgenden Zeitlupenbildern). Steht die optische Achse des Aufnahmeobjektivs senkrecht auf der Schlagebene, so können die Winkel den Zeitlupenaufnahmen sofort entnommen werden. Bildet die Schlagebene mit der Aufnahmerichtung (z. B. x_g) einen anderen Winkel ($\delta_{x_g} + 90^\circ$), so muß man die an den Aufnahmen gemessenen Winkel ($\Delta\varphi$) auf ihre wahre Größe ($\Delta\varphi_w$) umrechnen (s. Abb. 2). Mit der Windgeschwindigkeit w ist die Schlaggeschwindigkeit u_n eines Flügelschnittes mit dem Abstand n vom Drehpunkt des Flügels (am Vogel selbst zu messen) gegeben: $u_n = w \cdot n$.

Die Flügelbewegungen benennen wir nach ihrer Richtung im tierfesten Koordinatensystem. Der Abschlag wird von der Dorsal- nach der Ventralseite, d. h. mehr oder weniger in Richtung der positiven z -Achse geführt, der Aufschlag verläuft entgegengesetzt. Eine abweichende Benennung bei horizontaler Stellung der Schlagebene (Stolpe & Zimmer 1939 a, b; Hertel 1963) halte ich für überflüssig. Die Schlagwindgeschwindigkeit ist gleich der Schlaggeschwindigkeit des betreffenden Flügelschnittes und in ihrer Richtung der Schlagbewegung entgegengesetzt; die Flugwindgeschwindigkeit ist gleich der Fluggeschwindigkeit, ihre Richtung ist durch die negative x_a -Achse bestimmt. Für den Augenblick des Durchgangs des Flügels durch die x , y -Ebene (Abb. 3) läßt sich die resultierende Anströmung eines Flügelschnittes in Projektion auf die x , z -Ebene darstellen (und berechnen). Die Konstruktion der resultierenden Anblausgeschwindigkeit gilt grundsätzlich auch für jede andere Flügelstellung einer Schlagphase, sofern v und u_n gleich bleiben, nur läßt sie sich nicht verzerrungsfrei in der x , z -Ebene abbilden, da jedes Flügelement in der Schlagebene eine Kreisbahn beschreibt.

Bekanntlich sind Querschnitte durch den Vogelflügel Profile, die nach der Dorsalseite (= morphologische Oberseite) gekrümmt sind. Am starken Krümmungsbogen der Dorsalseite (Schlagebene) liegen die Querschnitte am stärksten gekrümmten Teil des Flügels. Am Rumpfende (Unterseite) liegen die Querschnitte am wenig gekrümmten Teil des Flügels.

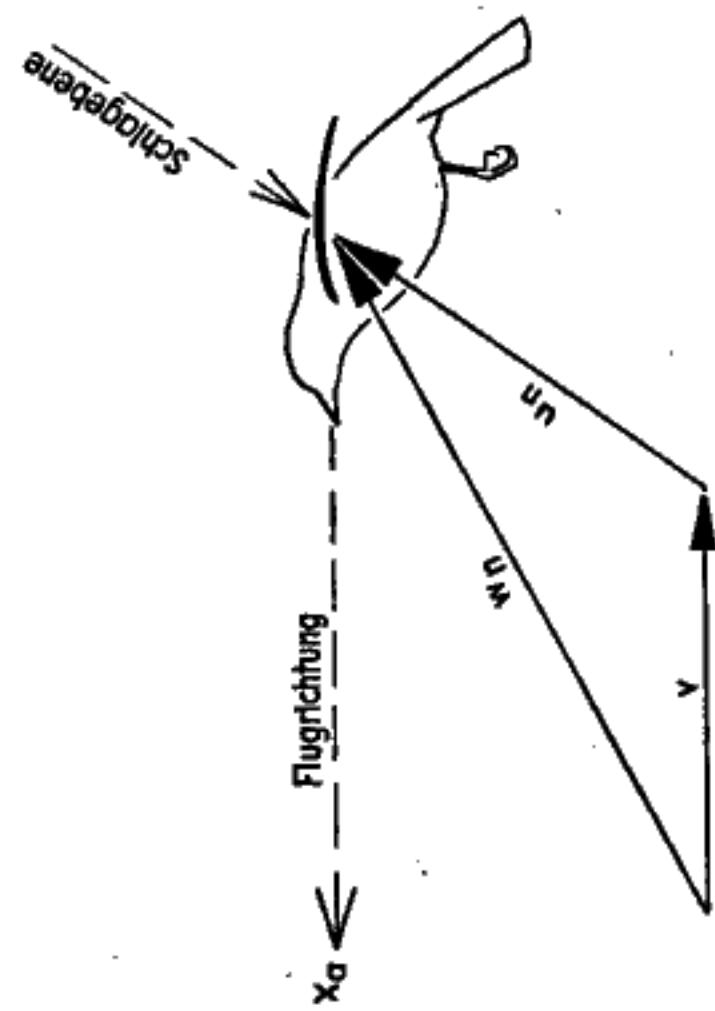


Abb. 3. Zur Bestimmung der resultierenden Anblausgeschwindigkeit eines Flügelschnittes. Projektion auf die x , z -Ebene. v Flugwindgeschwindigkeit = Fluggeschwindigkeit, u_n Schlagwindgeschwindigkeit = Schlaggeschwindigkeit eines Flügelschnittes mit dem Abstand n vom Drehpunkt des Flügels, w resultierende Anblausgeschwindigkeit. Weitere Erklärung s. Text

festsetzen, daß wir das Vorzeichen des Anstellwinkels α_a nach der Richtung der Anströmung zur morphologischen Ober- bzw. Unterseite bestimmen. Im allgemeinen führen stärker negative Anstellwinkel zur Funktionsumkehr mit der daraus resultierenden Verschlechterung des Wertes von W_F/A_F . Es gibt aber auch die Möglichkeit, daß bei negativen Anstellwinkeln das Profil seine Form umkehrt, die morphologische Oberseite also zur Konkavseite wird. Dann sind trotz des nach unserer Festsetzung negativen Anstellwinkels die Strömungsverhältnisse die wie bei positiven Werten von α_a . Von Holt (1943) hat auf diese Besonderheit am Kolibriflügel hingewiesen. Die Regel ist es aber nicht.

Die Entscheidung, ob α_a an einem bestimmten Flügelschnitt positiv oder negativ ist, ist wichtig, um über die Richtung der erzeugten Luftkraft (bezogen auf x_s) etwas auszusagen. Man verfährt dabei so: Gemessen wird der Winkel der Profilsehne (geometrischer Anstellwinkel α_{geom}) gegen eine Bezugslinie (z. B. x_g) in der Weise, daß die Profilhinterkante auf die Bezugslinie hinzieht. Dabei werden die Winkel (von $+x_g$ nach $-x_g$) positiv gezählt, wenn die Profilsehne von oben, negativ, wenn sie von unten auf die Bezugslinie trifft. In gleicher Weise werden die Winkel der resultierenden Anblasrichtung mit der Bezugslinie (geometrischer Anblaswinkel α_w) behandelt. Der aerodynamische Anstellwinkel ergibt sich dann nach $\alpha_s = \alpha_{geom} - \alpha_w$ (Abb. 5). Während α_w durch die Geschwindigkeiten v und u_n festgelegt ist, muß α_{geom} den Zeitlupenaufnahmen direkt entnommen werden. Hier liegt eine Fehlerquelle, da die geometrischen Anstellwinkel eines Flügelschnittes mit dem Abstand n vom Drehpunkt nicht immer exakt zu erfassen sind. Dies zwingt zur Vorsicht und zur Benutzung eines umfangreichen Bildmaterials.

Wenn die Richtung der an einem Flügelprofil erzeugten Luftkraft (L_F) bestimmt ist, kann man ihre Wirkung in Bezug auf die Flugwindachse (x_s) beurteilen. Weist L_F nach oben vorn, so enthält sie eine Komponente in Richtung der positiven x_s -Achse, den Schub oder Vortrieb S und eine in Richtung der negativen x_s -Achse, den Auftrieb A (Abb. 6). Bei einer Richtung nach oben hinten ergeben sich Rücktrieb (R, in Richtung $-x_s$) und Auftrieb, bei einer nach unten vorn Schub und Abtrieb (= „Auftrieb nach unten“, Richtung $+x_s$). Da der schlagende Flügel einen Kreissektor über-

streicht, ist, wie bereits erwähnt, diese Kräfteverteilung nur für den Augenblick des Flügelstelldungen vor oder nach der x_s - und x_g -Ebene voll gültig. Bei Flügelstellungen vor oder nach diesem Zeitpunkt geht ein Teil der senkrecht zum Schub wirkenden Kraft als Seitenkraft verloren. Die als Auftrieb in Richtung der x_s -Achse wirkende Komponente ist um so kleiner, je größer der Winkel des Flügels mit der x_s , y -Ebene ist (Oehmichen 1950; Oehmichen 1963, 1965 b, Nachtrag 1966 a). Für unsere qualitative Fragestellung, ob Auftrieb in einer Schlagphase überhaupt erzielt wird, ist dies jedoch ohne Belang.

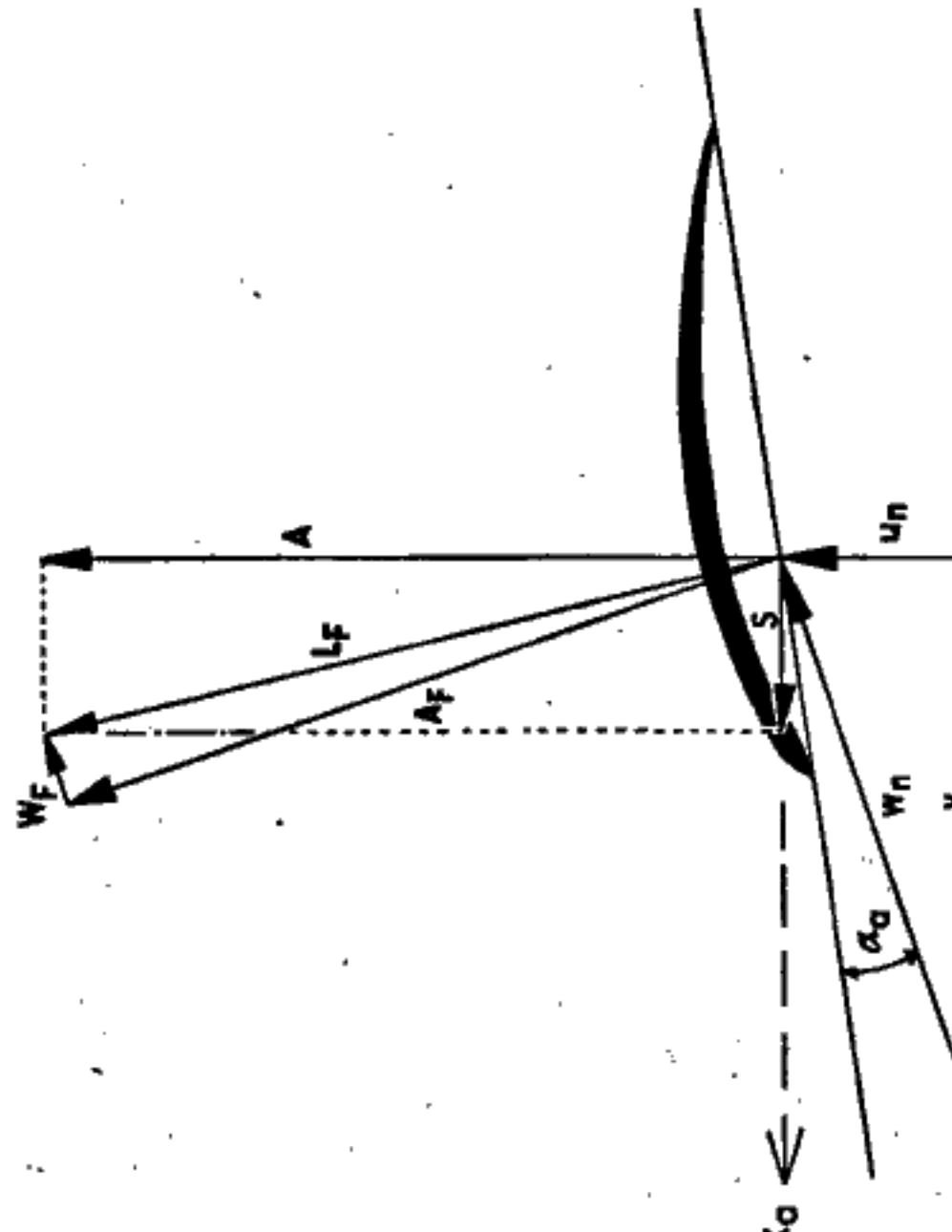


Abb. 6. Geschwindigkeiten und Luftkräfte am Flügelprofil. A Auftrieb, S Schub, sonstige Bezeichnungen wie in Abb. 3 und 5

Zwei Beispiele für das Kräftespiel im Kraftflug

Wir wenden die bisher erörterten Voraussetzungen auf Flugformen an, die zwei Modi der Luftkrafterzeugung im vollständigen Schlagzyklus repräsentieren, wobei gleich vorausgesetzt werden soll, daß die Verschiedenheit im Aufschlag liegt.

1. Der horizontale Schnellflug der Nebelkrähe

Die drei Koordinatensysteme fallen zusammen. Einen Überblick über den Ablauf des $1/4$ sec dauernden Schlagzyklus gibt Abb. 7.

1. Abschlag

Ausgangswerte: $\delta = 90^\circ$, $v = 13 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\omega = 18,15 \text{ sec}^{-1}$, Flügellänge (Schultergelenk — Flügelspitze) $l = 0,42 \text{ m}$.

Untersucht werden ein proximaler (bei 0,25 l) und ein distaler (bei 0,7 l) Flügelschnitt.

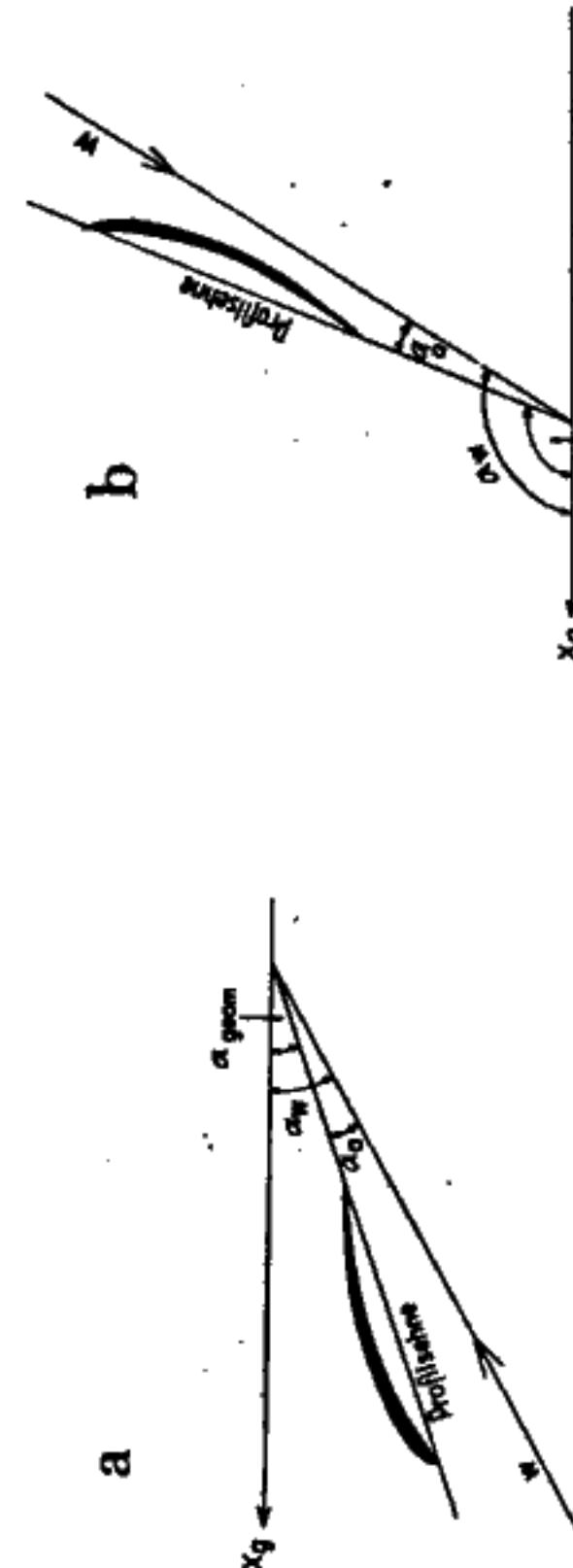


Abb. 5. Zur Bestimmung des aerodynamischen Anstellwinkels (a : positiver, b : negativer Anstellwinkel). Erläuterung s. Text

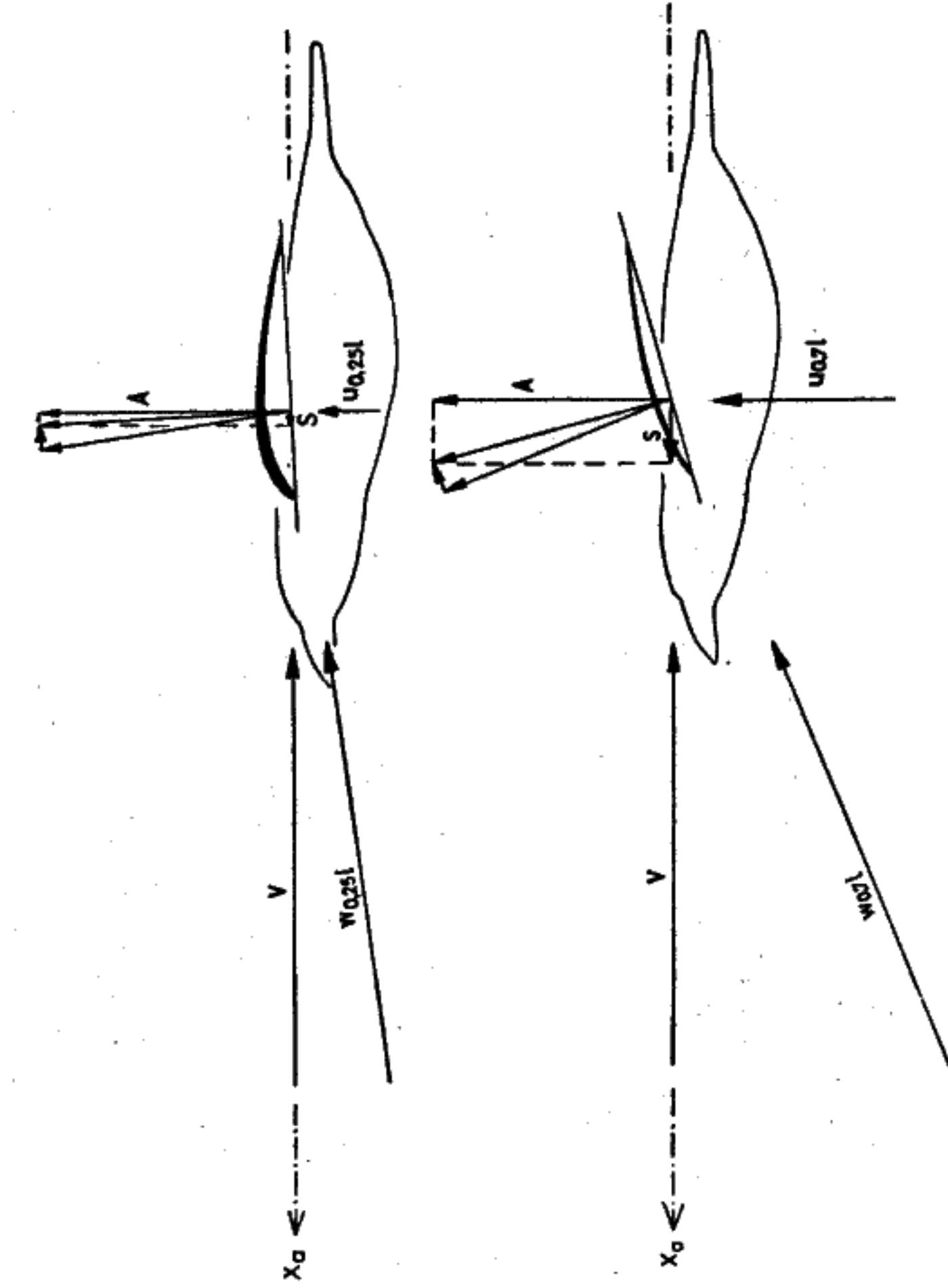


Abb. 8. Luftkräfte beim Abschlag (Nebelkrähe, Schnellflug). a: bei 0,25 1,
b: bei 0,7 1. Bezeichnungen wie Abb. 3, 5 und 6

0,25 1	$0,71$
	$1,91 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$
	$5,34 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$
α_{w}	$-8,3^\circ$
α_{geom}	$\approx -2^\circ$
α_a	$\approx 6^\circ$
	$\approx 7^\circ$

Ergebnis: Am gesamten Flügel entstehen Auftrieb und Schub. Der Schub ist im distalen Flügelteil (Hand) am größten (Abb. 8).

2. Aufschlag

Arm- und Handflügel müssen getrennt besprochen werden, denn anders als im Abschlag sind die beiden Flügelteile keine funktionelle Einheit.

a) Armflügel: Er bleibt entfaltet und wird (mit einer kleinen Unterbrechung in der Horizontalstellung) nach oben in die Ausgangsstellung für den neuen Abschlag geführt. Streng genommen, müßte diese Bewegung nochmals in 2 Abschnitte unterteilt werden: im ersten ist $\delta = 90^\circ$, im zweiten $\delta = 84^\circ$. Die Abweichung, die durch Annahme von $\delta = 90^\circ$ für die gesamte Bewegung entsteht, ist so gering, daß sie vernachlässigt werden kann.

Ausgangswerte: $v = 13 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\omega = 20 \text{ sec}^{-1}$ (Die Winkelgeschwindigkeit ist im Aufschlag nicht konstant. Es wird mit dem größten Wert von ω im letzten Teil der Bewegung gerechnet. Wenn nämlich sich mit diesem Wert eine Luftkraft in Richtung der morphologischen Oberseite des Profils ergibt, so ist dies erst recht bei jeder geringeren Winkelgeschwindigkeit ω).

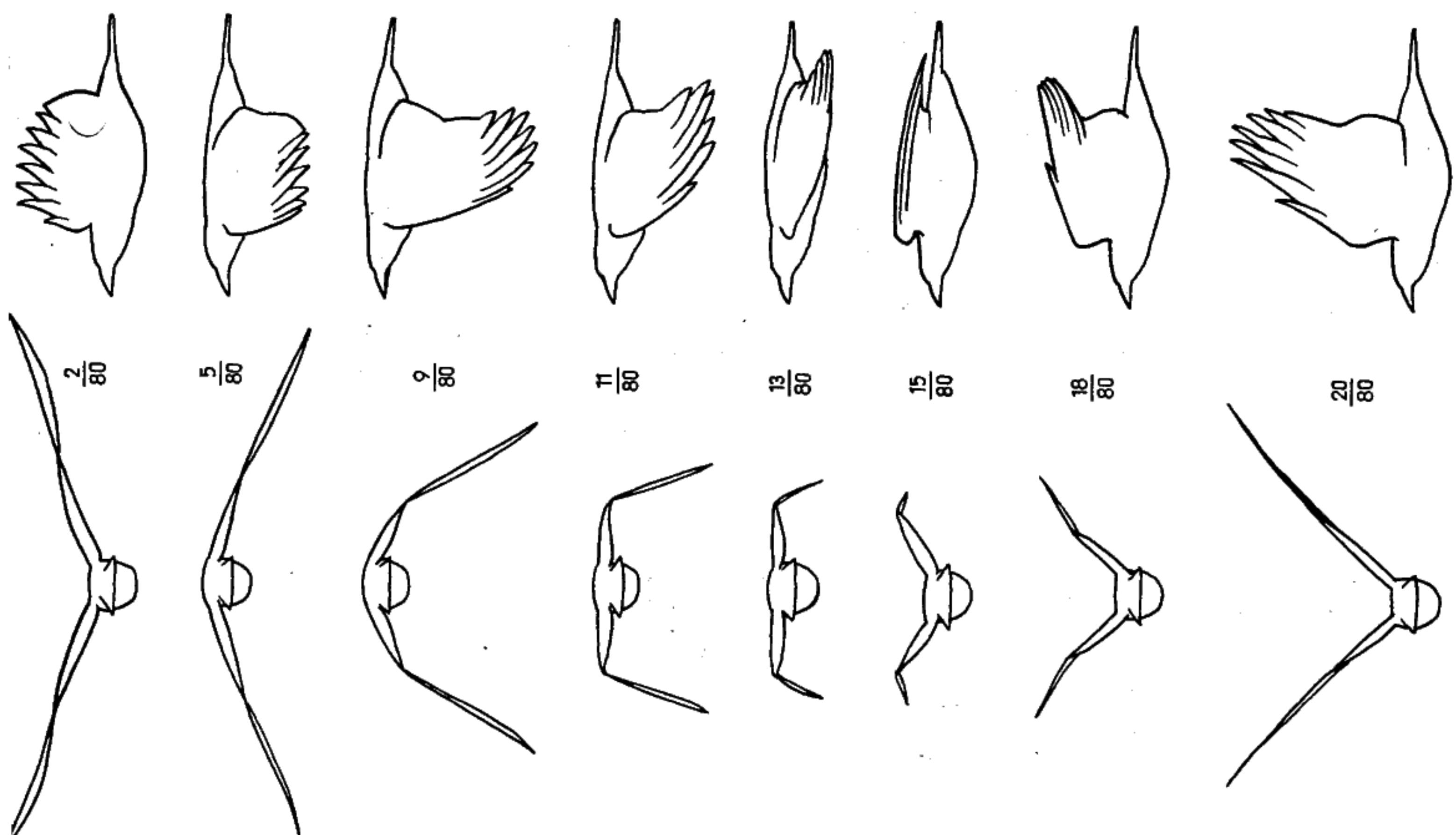


Abb. 7. Flügelbewegung der Nebelkrähe im Schnellflug. Zeichnungen nach Zeitlupeaufnahmen; Projektionen auf die y_a, z_a -Ebene (links) und die x_a, z_a -Ebene (rechts). Die Zahlen geben den Zeitabstand der Schlapphase in sec zum Beginn

Armsfüllänge (Schultergelenk — Handgelenk) $l_A = 0,12$ m. Untersucht wird der Flügelschnitt bei l_A .

$u = 2,4 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$; $\alpha_w = 10,5^\circ$; $\alpha_{geom} \approx 8^\circ$; $a_a \approx -3^\circ$. Ergebnis: Am Armflügel entsteht eine Luftkraft nach oben hinten. Das bedeutet Auftrieb (geringer als im Abschlag) und zusätzlichen Rücktrieb (Abb. 9). Nach dem Schultergelenk zu wird die Luftkraft größer und der Rücktrieb relativ kleiner (kleine Schlaggeschwindigkeit u_s , größerer aerodynamischer Anstellwinkel).

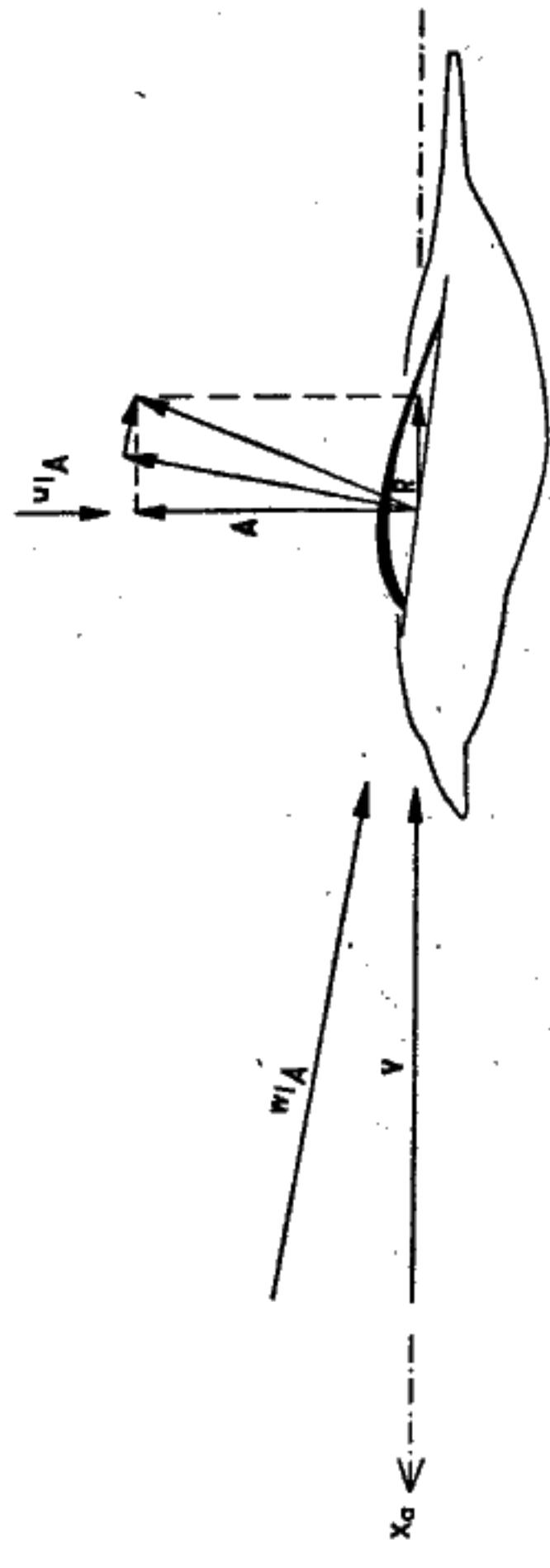


Abb. 9. Luftkräfte am Armflügel beim Aufschlag (Nebelkrähe, Schnellflug)
R Rücktrieb, Bezeichnungen sonst wie Abb. 8, vgl. Text

b) Handflügel: Während der Aufschlagsbewegung des Armes bleibt die Hand nach unten abgewinkelt. Die beiden Flügelteile bilden miteinander einen Winkel, der etwas größer als 90° ist (Projektion auf y, z). Zusätzlich wird der Handflügel immer stärker gefaltet, d. h. nach hinten parallel zum Körper hochgezogen. Er hat in dieser Phase des Aufschlages (etwa $\frac{1}{3}$) offensichtlich nicht die Aufgabe, Auftrieb zu erzeugen, sondern eher die, als eine Art „Endscheibe“ die Umströmung des als Tragfläche wirkenden Armflügels günstig zu erhalten (vgl. Oehm e 1965 b). Das letzte Drittel des Aufschlages ist durch die alleinige Bewegung der Hand gekennzeichnet. Der Armflügel hat seine Aufwärtsbewegung beendet und bleibt in einem Winkel von $\approx 45^\circ$ zur y-Achse stehen, wobei er natürlich weiter Auftrieb erzeugt. Der Handflügel steht zu dieser Zeit fast parallel zur y-Achse. Seine nun folgende Bewegung besteht aus zwei Drehungen um das Handgelenk. Die erste klappt den gefalteten Handflügel nach oben in die Ebene des Armflügels hin ein; sie beherrscht den ersten Abschnitt der Handbewegung. Die zweite entfaltet den Handflügel in dieser nun erreichten Ebene (Streckebene) zur Ausgangsstellung für den nächsten Abschlag; sie kennzeichnet den zweiten Abschnitt der Handbewegung (Abb. 10). Der erste Teil (Hin-einklappen in die Streckebene) verläuft mit einer Winkelgeschwindigkeit $\omega = 30 \text{ sec}^{-1}$ (in Projektion auf y, z). Das ergibt bei einer wirksamen „Handflügellänge“ (in Projektion auf y, z) von $\approx 0,07$ m eine Geschwindigkeit $u \approx 2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$. Danach ist $\alpha_w \approx 9^\circ$. Der geometrische Anstellwinkel des zusammengefalteten Handflügels (in Projektion auf x, z) ist $\alpha_{geom} \approx 7^\circ$. Mit $\alpha_a \approx -2^\circ$ ergibt sich: Kein Auftrieb, nur der unvermeidliche Zusatzwiderstand (Rücktrieb). Es ist jedoch eine geringe Erzeugung von Flügelauftrieb denkbar, denn wenn der Handflügel genau so angeblasen wird, daß $A_F = 0$

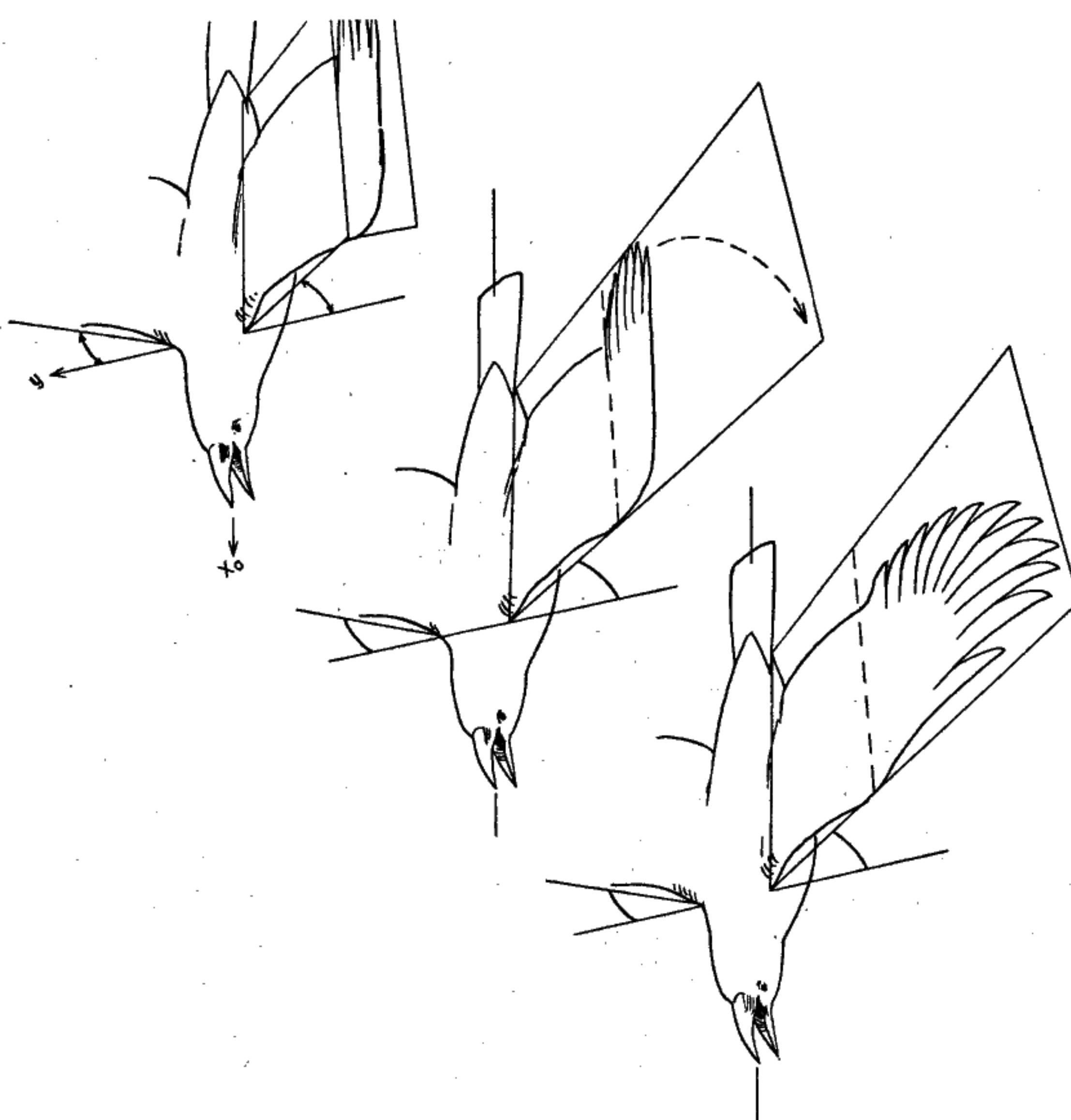


Abb. 10. Bewegung des Handflügels im letzten Teil des Aufschlages (Nebelkrähe, Schnellflug) Erläuterung s. Text

wird, wirkt der dann allein auftretende Flügelwiderstand nach hinten unten, hat also eine Abtriebskomponente. Durch einen geringen Flügelauftrieb ($\alpha_a \approx 0$) entsteht eine resultierende Luftkraft, die genau in Richtung der negativen x_a -Achse weist, also nur Widerstand, aber keinen Abtrieb hervorbringt. Der zweite Teil der Bewegung läuft in der Streckebene ab, so daß keine Änderung der Winkelstellung des Flügels (in Projektion auf y, z) mehr auftritt, denzufolge eine Schlaggeschwindigkeit u in unserem bisherigen Sinne fehlt. In der Streckebene entwickelt der Handflügel aber eine hohe Winkelgeschwindigkeit ($\omega \approx 35 \text{ sec}^{-1}$), was zu einer resultierenden Anströmung in dieser Ebene nach innen zu führt. Der geo-

metrische Anstellwinkel (in der Streckebene gegen x gemessen) liegt um 0° , z. T. ist er leicht negativ (bis -3°). Seine Ermittlung ist an A -nahmen von der Seite (Projektion auf x, z) oder von hinten (Projektion auf y, z) nicht möglich. Man kann ihn aber an Aufnahmen von tieffliegenden Vögeln abschätzen, die von einem erhöhten Kamerastandpunkt aus gefilmt wurden, wobei man seitlich von oben, also in der Streckebene, auf den Vogel sieht. Ergebnis: Kein Auftrieb, nur Zusatzwiderstand (Rücktrieb). Auch hier ist eine geringe Auftriebwirkung des sich entfaltenden Handflügels denkbar. Ist $A_F = 0$, hat der dann allein auftretende Flügelwiderstand resultierenden Anströmung eine Abtriebskomponente, die sich durch geringen Flügelauftrieb beseitigen läßt, so daß dann wiederum nur Zusatzwiderstand bleibt. Ob diese Möglichkeiten, den Abtrieb „aufzufangen“, verwirklicht sind oder ob der geringe Abtrieb in Kauf genommen wird, läßt sich nicht entscheiden. Überhaupt ist diese Darstellung der Handflügelbewegung bewußt vereinfacht. In Wirklichkeit laufen beide Bewegungskomponenten (Schlag nach oben in die Streckebene und Strecken und Entfalten der Hand nach vorne) gleichzeitig ab, nur daß am Anfang die Schlagbewegung, später die Streckbewegung überwiegt. Aber auch wenn man die Bahnen einzelner Flügelschnitte und ihre Anblasrichtungen an räumlichen Modellen konstruiert, kommt man zum gleichen Resultat: Am Handflügel entsteht in der letzten Aufschlagsphase praktisch nur Rücktrieb.

2. Der horizontale Langsamflug („Bremsflug“) der Haustaube

Brown (1948) hat diese Flugform im Laboratorium bearbeitet und erstklassiges Bildmaterial veröffentlicht. Eigene Freilanduntersuchungen ergaben eine nahezu vollständige Übereinstimmung in den für die Rechnungen wichtigen Werten (Geschwindigkeiten, Winkel). Das Flugwindfeste und das geokline Koordinatensystem fallen zusammen. Einen Überblick über den reichlich $1/8$ sec dauernden Schlagzyklus erhält man aus Abb. 11. Im vorigen Beispiel wurde die Anblasgeschwindigkeit (w) eines bestimmten Flügelschnittes aus den beiden Geschwindigkeiten v und u bestimmt. Für große Fluggeschwindigkeiten ist dieses Näherungsverfahren brauchbar, bei sehr kleinen dagegen ist die Tatsache zu berücksichtigen, daß die Flügel, um Schub zu erzeugen, die Luft wie Propellerblätter nach hinten beschleunigen. Die entstehende zusätzliche Strahlgeschwindigkeit in der Schlagebene kann bei kleinem v nicht vernachlässigt werden. Sie wurde hier etwas kleiner angesetzt, als sie beim senkrechten Hubstrahl einer am Ort fliegenden Taube sein müßte. Für diesen Fall ist sie durch das Gewicht ($\approx 0,3$ kp) und durch die von den Flügeln bestrichene Fläche (2 Halbkreise mit der Flügellänge als Radius) gegeben. In unserem Fall wurde sie, ausgehend von einer mittleren Strahlgeschwindigkeit, für den Abschlag etwas größer, für den Aufschlag etwas kleiner angenommen, da, wie wir noch sehen werden, bei letzterem nur die Länge des Handflügels wirksam wird. Die resultierende Geschwindigkeit w wird also nun bestimmt durch v

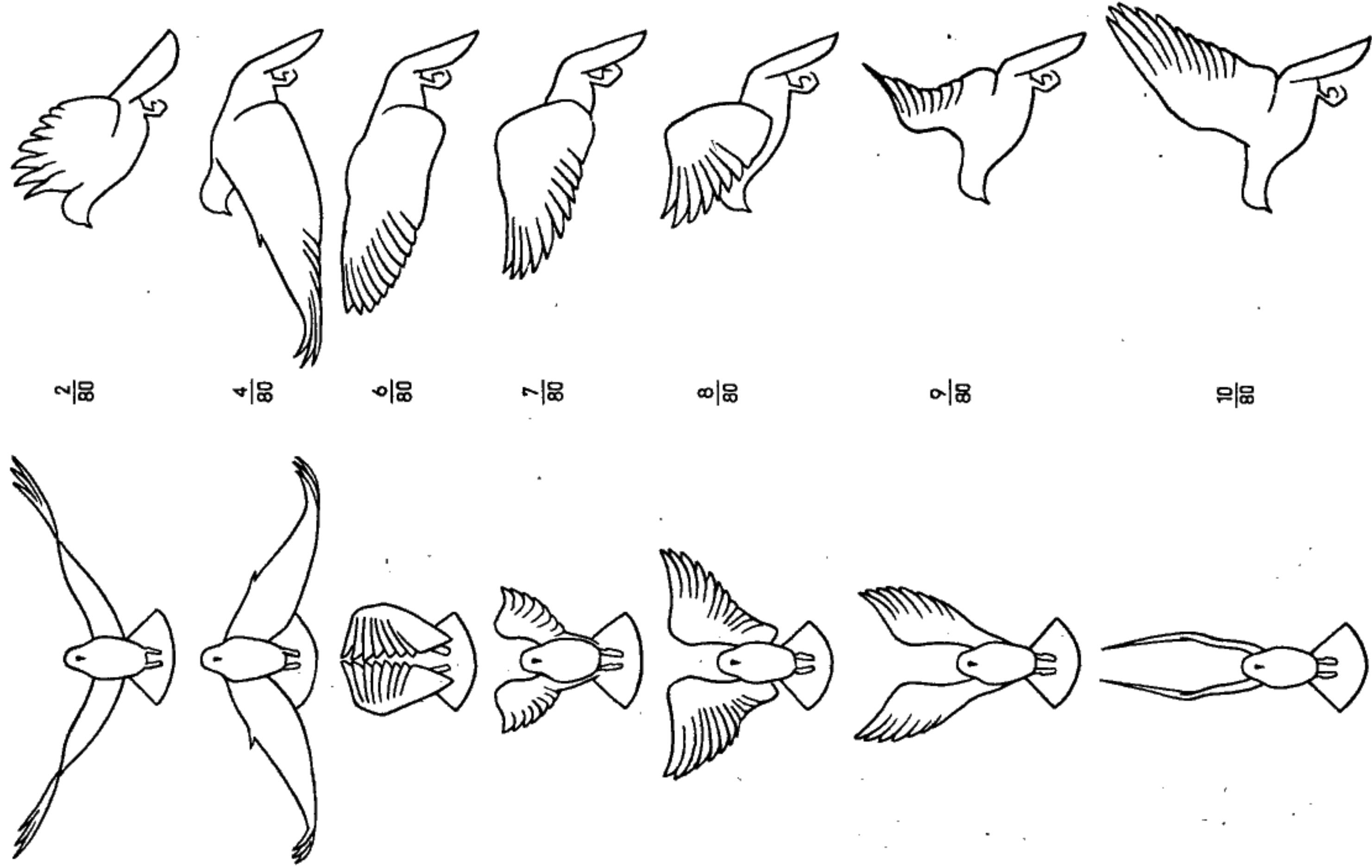


Abb. 11. Flügelbewegung der Haustaube im Langsamflug (Bremsflug). Zeichnungen nach Zeitlupeaufnahmen; Projektionen auf die y_{nn} -Ebene (links) und die $x_{nn} z_{nn}$ -Ebene (rechts). Die Zahlen geben den Zeitstatus der Schlagphase an sec zum Beginn des Abschlages an

(Fluggeschwindigkeit, Richtung x_a), u (Schlaggeschwindigkeit, Richtung in der Schlagebene), w_s (Strahlgeschwindigkeit in der Schlagebene).

1. Abschlag

Ausgangswerte: $\delta_{xg} = 140^\circ$, $v = 2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $w_s = 1,5 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\omega = 50 \text{ sec}^{-1}$, Flügelänge (Schultergelenk — Flügelspitze) $l = 0,32 \text{ m}$. Untersucht wird der Flügelschnitt bei $0,7 l$. $u = 11,2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\alpha_w = -26,9^\circ$, $\alpha_{geom} \approx -20^\circ$; $\alpha_a \approx 7^\circ$.

Ergebnis: Im Abschlag erzeugen die Flügel Auftrieb und Schub (Abb. 12). Der Flügelwiderstand der inneren Flügelteile ist wegen des großen Anstellwinkels relativ hoch, so daß die resultierende Luftkraft (auch wegen der geringeren Schlaggeschwindigkeit) hier etwa in Richtung $-z_g$ zielt. Gegen Ende des Abschlages werden auch die Anstellwinkel im äußeren Flügelteil größer, so daß dann die erzeugte Luftkraft kaum noch eine Vortriebskomponente hat.

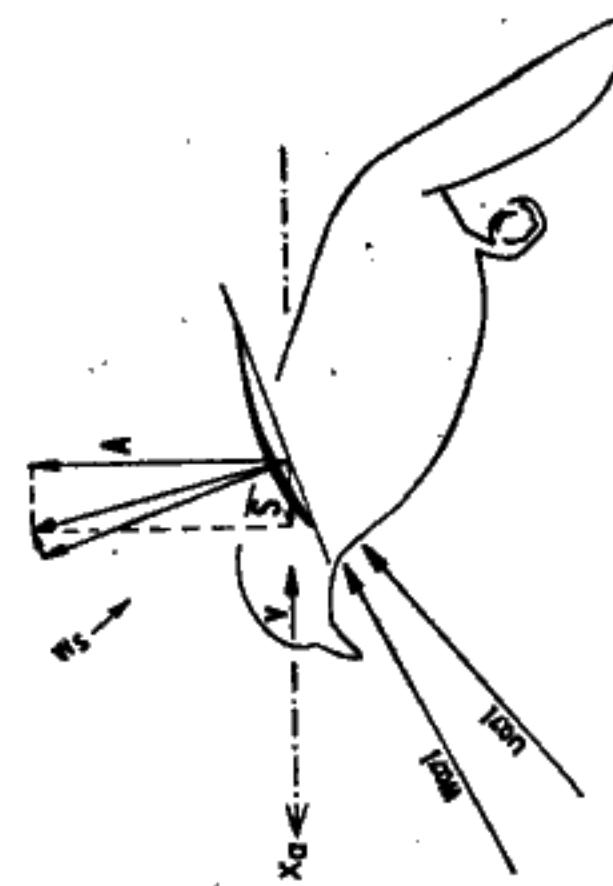


Abb. 12. Luftkräfte beim Abschlag (Haustaube, Bremsflug). w_s , Strahlgeschwindigkeit, Bezeichnungen sonst wie Abb. 8, vgl. Text

2. Aufschlag

Am Ende des Abschlages werden die Flügel aus der Schlagebene heraus nach vorn oben geführt, so daß sich die Handschwingen vor dem Kopf befinden. Dieser Teil der Flügelbewegung fällt für die Luftkrafterzeugung praktisch aus. Nunmehr werden Ellenbogen- und Handgelenk stark gebogen, so daß das Handgelenk über das Schultergelenk zu stehen kommt, wobei die Hand stark supiniert ist (Bei Ansicht von vorn sieht man jetzt auf die Unterseite des Flügels). In dieser Stellung wird der Aufschlag defacto um das Handgelenk als Drehpunkt ausgeführt, wobei die Handschwingen sich zu einer Spaltflügelkaskade öffnen. (Solche Spaltflügel erzeugen bei großen Anstellwinkeln, wo beim nicht unterteilten Profil die Strömungsverhältnisse schon schlecht werden, einen großen Flügelauftrieb, wobei das Verhältnis W_F/A_F noch günstig, d. h. relativ klein, bleibt). Der Armflügel ist gefaltet und spielt für die Luftkrafterzeugung keine Rolle. Die Schlagebene des Handflügels liegt flacher als die des gesamten Flügels im Abschlag. Am Ende des Aufschlages wird der Flügel wieder gestreckt und in die Abschlagstellung gebracht; dabei werden praktisch wiederum

keine Luftkräfte erzeugt. Zur verzeichnungsfreien Abbildung in der x , z -Ebene muß man (Ebene für den Durchgang des Handflügels durch die Horizontale parallel zu x_a , y_a in die Höhe der Handgelenke legen (s. Abb. 13)).

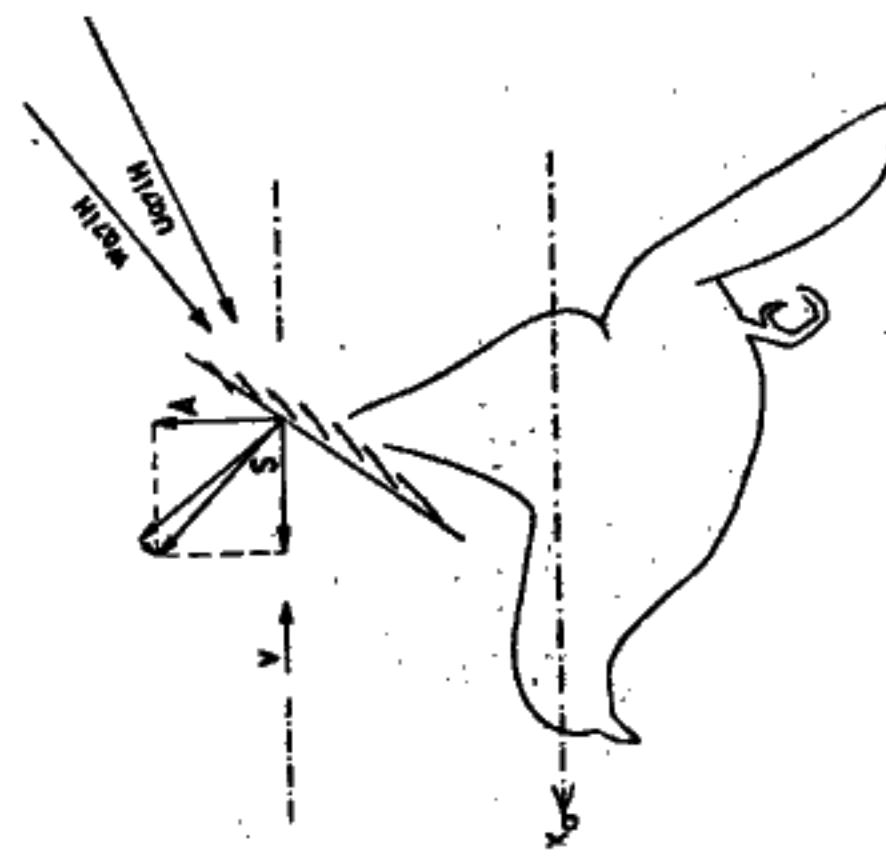


Abb. 13. Luftkräfte beim Aufschlag (Haustaube, Bremsflug). Bezeichnungen wie Abb. 8, vgl. Text

Ausgangswerte: $\delta_{xg} = 155^\circ$, $v = 2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $w_s = 1 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\omega = 65 \text{ sec}^{-1}$, Handflügelänge (Handgelenk — Flügelspitze) $l_H = 0,22 \text{ m}$. Untersucht wird der Flügelschnitt bei $0,7 l_H$.
 $u = 10 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, $\alpha_w = 142^\circ$, $\alpha_{geom} \approx 125^\circ$, $\alpha_a \approx -17^\circ$.

Ergebnis: Der unter negativem Anstellwinkel angeblasene Handflügel erzeugt eine Luftkraft nach oben vorn (Abb. 13). Es entsteht also wiederum Auftrieb und Schub, letzterer relativ größer als im Abschlag.

Die beiden aerodynamisch verschiedenen Formen des Kraftfluges

Zunächst noch eine Bemerkung zu dem soeben vorgeführten Verfahren: Wie schon betont, handelt es sich um angenäherte Lösungen der aufgeworfenen Frage, in welcher Richtung die vom schlagenden Flügel erzeugten Luftkräfte wirken. Wir haben die gekrümmten Flächen, die die Flügelschnitte überstreichen, durch Ebenen ersetzt. Wir haben weiter kleine periodische Änderungen der Fluggeschwindigkeit während des Schlagzyklus vernachlässigt, und wir haben die Strömungsverhältnisse in der Nähe des Wechsels der Schlagphasen nicht näher betrachtet. Den Meßverfahren innewohnende Ungenauigkeiten ließen zum Teil auch keine eindeutige Aussage über die Wirkung der Luftkräfte (Aufschlag der Krähe) zu. Aber diese Einschränkungen beeinträchtigen die Befunde nicht grundsätzlich, so daß die eingangs gestellte Frage wohl im allgemeinen richtig beantwortet werden kann.

Am Beispiel der Nebelkrähe und der Haustaube haben wir die beiden Formen der Luftkrafterzeugung im Kraftflug vor Augen. Wir haben einen

Flügelaufschlag ohne (Krähe) oder mit (Taube) Schubkugelung zu unterscheiden. Die andersartige Deutung des Aufschlages der Taube durch Hertel (1963), nach der kein Schub und kein Auftrieb entstehen sollen, halte ich nicht für zutreffend. Hingegen stimmen meine Befunde mit der Meinung Brown's (1948) überein.

Der normale Horizontalflug (Schnellflug) ist, soweit verwerthbares Filmmaterial eine Aussage gestattet, bei größeren Vögeln im Prinzip so wie bei der Nebelkrähe: Schub wird nur im Abschlag erzeugt (Brown 1953, Oehme 1965 b, Korschaysky 1966). Die Auftrieberzeugung im Aufschlag bleibt hinter der im Abschlag zurück. Nichts spricht bisher für einen gleichbleibenden Auftrieb in beiden Schlagphasen (von Holt 1953) oder gar für eine Beteiligung des Handflügels an der Auftrieberzeugung im Aufschlag (Stolpe & Zimmer 1939 b). Die Aufschlagsbewegung wird in erster Linie so ausgeführt, daß möglichst wenig schädliche Luftkräfte, d. h. zusätzlicher Rücktrieb (= Vergrößerung des Rumpfwiderstandes), auftreten. Also wird die Hand weitgehend daran gehindert, Flügelauftrieb zu erzeugen. Denn je weiter außen am Flügel eine nach oben wirkende Luftkraft entsteht, um so mehr würde sie wegen der dort relativ großen Schlaggeschwindigkeit ($u = \omega \cdot n$) nach hinten geneigt sein, lieferte also eine um so größere Rücktriebskomponente. Das Schwanken des Auftriebs in Ab- und Aufschlag und die Beschränkung des Schubs auf den Abschlag werden bei größeren Geschwindigkeiten durch die Trägheit des Vogelkörpers überwunden, so daß eine praktisch gleichförmige Bewegung erzielt wird. Beim Mauersegler soll aber nach von Holt (1943, 1953) und Lack (1956) im Schnellflug ein Schlagmodus auftreten, der auch während des Aufschlages Schub hervorbringt. Ich habe diese Ansicht auch vertreten (Oehme 1959), bin aber nach neueren, noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen der Meinung, daß auch der Horizontalflug des Mauerseglers prinzipiell so verläuft, wie es am Beispiel der Krähe demonstriert wurde. Für Jongbloeds (1938) Annahme, der Aufschlag beim Horizontalflug erzeuge immer Vortrieb, spricht überhaupt nichts. Selbst beim Schnellflug des Rubinkehlkolibris soll nach Greenewalt (1960) der Aufschlag ohne Schuberzeugung ausgeführt werden.

Eine Modifikation tritt bei vielen kleinen Vögeln mit hoher Schlagfrequenz auf. Die Flügel werden beim Aufschlag ganz zusammengefaltet (also auch der Armflügel), an den Körper herangezogen und dann in die neue Abschlagstellung hinein wieder entfaltet. Der Aufschlag liefert so nur einen kleinen Zusatzwiderstand, aber auch keinen Auftrieb. Für kleine Vögel mit geringer Masse ist das unbedingt ein Vorteil, weil so die Erzeugung zusätzlichen Rücktriebes auf ein Minimum beschränkt wird. Jedoch ist vor Verallgemeinerungen zu warnen: Schwalben verfahren so wie die Krähe (der Armflügel bleibt im Aufschlag entfaltet), Elster und Eichelhäher zeigen vollständige Faltung des Flügels.

Das Bild, das uns die Haustaube im Bremsflug zeigte, finden wir mit gewissen Modifikationen auch bei anderen Flugformen, nur nicht beim horizontalen Schnellflug. Durch Veränderungen in der Schlaggeschwindigkeit, dem Anstellwinkel der Flügel und der Stellung der Schlagebene kann die

in Abb. 1 Aufschlag erzeugte Luftkraft z. B. so verändert werden, daß der Auftrieb kleiner als das Körpergewicht wird und der Schub sehr zurückgeht. Dann sinkt der Vogel flügelschlagend langsam zu Boden: eine für die Haustaube typische Form der Landung. Viele Vögel beenden den Flug auf diese Weise, indem nach mehr oder weniger langem Gleitflug kurz vor dem Landen oder Wassern ein solcher Bremsflug ausgeführt wird: Enten, Gänse, Raubvögel, Reiher, Möwen u. a. Man erkennt auf Bildern des Flügelaufschlages dann immer, daß das Ellenbogengelenk stark gebeugt ist und die (von der morphologischen Oberseite her angeblasenen) Handschwingen sich zur Spaltflügelskade öffnen (Lorenz 1933, Storer 1948, Oehme 1958). Werden dagegen durch besonders schnelle Flügelschläge und große Anstellwinkel Auftrieb und vor allem (durch entsprechende Stellung der Schlagebene) Schub maximal gemacht, so ermöglicht das dem Vogel einen raschen und relativ steilen Start. Auch das führt die mit lautem Flügelklatschen abstreichende Haustaube fast ideal vor, und der aufmerksame Beobachter kann recht gut den Moment erkennen, wo die hastigen Schläge der Beschleunigungs- und Steigflugphase (mit Schub in Auf- und Abschlag) in die viel ruhigeren des Horizontalfluges (mit Schub nur im Abschlag) übergehen. Auch bei auffliegenden Enten, Reihern und Hühnern ist das gleiche festzustellen (Storer 1948). Ganz ähnlich ist die Situation, wenn der Vogel aus dem Horizontalflug die Flugbahn aufrichtet und zu einem steilen Steigflug übergeht. Er wechselt dabei den Schlagmodus und „hängt sich“ gewissermaßen zum großen Teil an den in Ab- und Aufschlag erzeugten Schub.

Das „An-den-Schub-Hängen“ wird vollkommen, wenn die „Flugbahn“ (x_a) mit der negativen z_a -Achse zusammenfällt. Ist der Schub dann gerade so groß wie das Gewicht, so fliegt der Vogel auf der Stelle (in ruhender Luft). Ein „Flugwind“ in der Bedeutung wie beim Horizontalflug oder einem Flug mit horizontaler Bahnkomponente (schräger Steigflug) existiert dann nicht mehr. Aber die schlagenden Flügel werden außer von Schlagwind durch die von ihnen durch den Hubstrahl angesaugte Luft aus Richtung x_a angeströmt. So erklärt sich z. B. der sehr große geometrische Anstellwinkel (gegen x_g) beim auf der Stelle fliegenden Kolibri (30° bis 40° im Abschlag, 140° bis 150° im Aufschlag). Der aerodynamische Anstellwinkel liegt dagegen zwischen 20° und 30°. [Wegen der kurzen Dauer eines Ab- oder Aufschlages ($1/57$ sec beim schwarzweissen Kolibri) führen diese immer noch sehr großen Anstellwinkel zu keinen ungünstigen Strömungszuständen (Hertel 1963)]. Die durch die Flügelschläge senkrecht zum Schub erzeugten Luftkraftkomponenten (im Abschlag in Richtung $-z_a$, im Aufschlag $+z_a$) heben sich auf (Stolpe & Zimmer 1939 a; Hertel 1963).

Nun darf man aber nicht annehmen, daß bei allen Vögeln langsamer Horizontalflug, Start, Landung und Flug auf der Stelle gleichbedeutend sind mit Schuberzeugung in beiden Phasen des Schlagzyklus. Beim Bremsflug des Staren (Oehme 1963) und des Fahnendrongo (Oehme 1965 a) wird der Flügel im Aufschlag vollständig gefaltet, Star und Amsel (Oehme 1963) starten mit „normalen“ Flügelschlägen, d. h. ohne Schub-

erzeugung im Aufschlag. Der Flügelaufschlag eines auf d. Stelle fliegenden Nektarvogels (Zimmer 1943) oder Rotschwanzes (Oehme 1959) vollzieht sich ebenso wie beim Horizontalflug, nämlich unter vollständiger Faltung des Flügels im Aufschlag. Für den Steigflug der Feldlerche gilt nach meinen (noch nicht veröffentlichten) Untersuchungen ebenso, daß Schub nur im Abschlag produziert wird.

Die beiden Formen des Flügelaufschlages werden auch als „aktiv“ (mit Schuberzeugung) und „passiv“ (ohne Schuberzeugung) bezeichnet. Damit ist die Vorstellung verbunden, daß der Flügel beim „passiven“ Aufschlag des Schnellfluges durch den an ihm erzeugten Auftrieb gehoben wird. Der Aufschlag vieler kleiner Vögel (vollständige Faltung des Flügels) erzeugt keinen Auftrieb, muß also „aktiv“ sein, obwohl er keinen Schub hervorruft. Entsteht am Flügel Auftrieb, so wird seine Bewegung durch die Gegenspannung des Flügelsenkens verlangsamt, denn sonst käme die erzeugte Vertikalkraft nicht dem Vogel, sondern nur der Drehbewegung zugute. Die aufzuwendende Muskelarbeit ist natürlich viel geringer als im Abschlag. Es empfiehlt sich also, den Modus des Flügelaufschlages nach seiner aerodynamischen Wirkung zu kennzeichnen. Das Kriterium ist, ob er Schub erzeugt oder nicht. Eine Entscheidung darüber läßt sich jedoch erst fällen, wenn die Strömungsverhältnisse am Flügel des Vogels (wenn auch nur angenähert) dargestellt werden können. Die Voraussetzungen dafür haben wir kennengelernt.

Fragen der Terminologie

Wir kommen nun auf die eingangs skizzierten Schwierigkeiten zurück, die darin liegen, daß manche Bezeichnungen für bestimmte Formen des Kraftfluges nicht eindeutig definiert sind und (oder) zu fehlerhaften Aussagen führen können.

Häufig wird vom Ruderflug, vor allem größerer Vögel, gesprochen. Eine Luftkrafterzeugung nach dem Prinzip des Ruderblattes (Fläche senkrecht zur Anblasrichtung) gibt es aber am Vogelflügel nicht. Der Vogel fliegt nicht „mit dem Widerstand“, sondern mit der aerodynamischen Querkraft oder dem Flügelauftrieb seiner Flügel. Die Flugbewegung eines Reihers mag zwar in ihrer äußeren Erscheinung etwas an eine Ruderbewegung erinnern, aber diese Ähnlichkeit ist m. E. nicht ausreichend, um den seinem Wesen nach falschen Begriff des Ruderns im Hinblick auf den Vogelflug zu rechtfertigen. Es ist dies keine Wortklauberei, denn Lorenz (1933) hat den unbeschleunigten Horizontalflug als Gleitrudern bezeichnet und meinte, der Vogel drücke sich durch den Abschlag hoch, um die so gewonnene Höhe während des Aufschlages in Vorwärtsbewegung umzusetzen. [Die geringe Höhenschwankung des Vogels in einem Schlagzyklus sieht dagegen ganz anders aus. Der im Abschlag erzielte Auftriebsüberschuß wirkt sich im ersten Teil des Aufschlages aus (von Holt & Küchemann 1941, Oehme 1965 b).]

Der Rück „Rütteln“ hat verschiedene Bedeutungen erlangt. Die ursprüngliche war es wohl, daß der Vogel mit schnellen Flügelschlägen auf der Stelle (und zwar gegenüber dem Beobachter auf der Erde) fliegt. Lorenz (1933) hat aber die Bedeutung des Begriffes verändert, indem er die Schuberzeugung im Flügelaufschlag zum Kriterium des Rüttelns machte. Er unterschied Platzrütteln, Bremsrütteln (was etwa unserem ausführlich erörterten Bremsflug der Taube entspricht) und Beschleunigungsrütteln. Aber Lorenz bildet in der gleichen Arbeit einen „rüttelnden“ Fliegenschnäpper ab, bei dem ja das für seine Definition Entscheidende, nämlich der schuberzeugende Flügelaufschlag, gerade fehlt. Zimmer (1943) hat dann, vielleicht um Widersprüche zur Lorenzschen Definition zu vermeiden, den Flug am Ort bei einem Nektarvogel als Trillerflug bezeichnet. Ich habe versucht, diese Bezeichnung auf alle die Flugformen auszudehnen, bei denen der Flügel im Aufschlag vollständig gefaltet wird (Oehme 1959, 1965 a). Es ist aber wahrscheinlich besser, diesen Versuch zu unterlassen. Das Merkmal, welches für den Flug des Nektarvogels typisch ist — nach mehreren schnellen Flügelschlägen (Flügeltriller) wird eine Pause, das sogenannte „Anhalten“ eingeschoben —, fehlt z. B. dem Drongo und dem Star. Ich schlage vor, den Begriff „Rütteln“ wieder in der ursprünglichen Bedeutung zu verwenden. Dann besagt er lediglich, daß der Vogel flügelschlagend auf der Stelle (gegenüber der Erde) fliegt. Er soll nicht sagen, durch welche aerodynamischen Besonderheiten dieser Flug auf der Stelle ausgezeichnet ist. Denn dasselbe Vogel kann das unter verschiedenen Bedingungen ganz verschieden zuwege bringen. Ein Turmfalke rüttelt bei Windstille mit einem schuberzeugenden Aufschlag, bei stärkerem Wind fliegt er mit „gewöhnlichem“ Flügelschlag (also ohne Schuberzung im Aufschlag) gegen den Wind so schnell, daß seine Fluggeschwindigkeit gleich der Windgeschwindigkeit, seine „Geschwindigkeit über Grund“ damit aber gleich Null ist. Die Sonderbezeichnung „Platzrütteln“, „Bremsrütteln“, „Beschleunigungsrütteln“ mögen am besten nicht mehr gebraucht werden. Werden sie doch benutzt, so ist das nur in der Lorenzschen Definition möglich. Dann muß man sich über ihre aerodynamische Aussage im klaren sein. „Rüttelnde“ Rotschwänze oder Würger darf es dann nicht geben. Wenn der Terminus „Rütteln“ in der von mir vorgeschlagenen Art umrissen ist, kann man ihn auf jeden Vogel, der auf der Stelle fliegt, anwenden. Es wird damit eine bestimmte Verhaltensweise des Tieres bezeichnet. Ökologisch und ethologisch dürfte nämlich das „Rütteln“ eines Nektarvogels und eines Kolibris vor einer nektarspendenden Blüte ziemlich gleichwertig sein. Ob man die Bezeichnung „Schwirrflug“ für das Rütteln der Kolibris beibehalten soll, ist zu überlegen. Das Wort Schwirrflug wird besser zur Kennzeichnung eines Fluges mit sehr hoher Schlagfrequenz verwendet. Der Flug der meisten Insekten ist demnach Schwirrfug. Nun liegt die Schlagfrequenz vieler Kolibriarten erheblich höher als bei den anderen Vögeln, aber der Riesenkolibri wird mit 10 Flügelschlägen in der Sekunde von vielen kleinen Vögeln übertrffen (Rotschwänze, Fliegenschnäpper, Grasmücken, Finken, Goldhähnchen, Meisen u. a.). Folgerichtig dürfte man bei ihm die Bezeichnung Schwirrfug nicht verwenden, oder man müßte das

auch bei den anderen Kleinvögeln tun. Böker (1931) jedoch hat den Flug von Schwalben, Seglern, Kolibris und Ziegenmelkern als Schwirrflug bezeichnet und gab als Merkmal dieses Schwirrfluges an, daß der betreffende Vogel durch sehr schnelle Flügelschläge rasch Höhe gewinnt. Das dies genaus für die oben genannten Kleinvögel zutrifft, liegt auf der Hand, aber Böker nannte den Flug dieser Vögel „Hubflug“. Schwalben, Segler und Ziegenmelker liegen in ihrer Schlagfrequenz außerdem niedriger als diese sogenannten Hubflieger, so daß die Fragwürdigkeit der Bezeichnung offensichtlich ist. Böker hat ja aber auch den Flugvorgang gar nicht untersucht, sondern gruppierte die Vögel nach Skelettproportionen des Flügels in verschiedene „Flugtypen“. In ganz anderer Bedeutung hat dagegen Demoll (1930) das Wort „Hubflug“ verwendet. Er sah in ihm den Gegensatz zum „Drachenflug“, den er bei größeren Vögeln postulierte, während kleine Vögel und Insekten „Hubflieger“ seien. Er sieht den Unterschied in folgendem: Beim Drachenflug sei die Vorwärtsbewegung des Vogels das Wesentliche und die Voraussetzung, um eine hebende Kraft zu erzeugen, beim Hubflug werde durch den Flügelschlag primär Höhe gewonnen, die zum Teil in Geschwindigkeit umgesetzt würde. Hier werden also grundätzliche Aussagen über das Kräftepiel des Fluges gemacht. Sieht man von besonderen Flugformen ab und vergleicht nur den unbeschleunigten horizontalen Schnellflug von großen und kleinen Vögeln, so findet man die Dinge jedoch in gewisser Beziehung gerade umgekehrt. Der große Vogel braucht (bei in der Regel niedriger Schlagzahl) eine möglichst große Auftriebsausbeute während des Flügelschlags; deshalb die Auftrieberzeugung im Aufschlag, die bei sehr großen Vögeln wahrscheinlich die bei der Krähe übertrifft. Der kleine Vogel (mit in der Regel hoher Schlagzahl) braucht eine hohe Schubausbeute. Wegen seiner geringen Masse müssen in kurzen Abständen relativ große Impulse erfolgen, um eine gleichmäßige Vorwärtsbewegung zu gewährleisten. Der erforderliche Auftrieb fällt „nebenbei“ ab. Man darf diese Gegenüberstellung nicht verallgemeinern. Kleine Vögel wie die Rauchschawalbe verfahren im Prinzip wie die großen Vögel (ihre Körper ist strömungstechnisch aber auch hervorragend „durchkonstruiert“), größere hoch flächenbelastete Vögel wie Seeentaucher, Alken und Hühner fliegen mit (ihrer Größe entsprechend) sehr hohen Schlagzahlen und damit offensichtlich hoher Schubausbeute.

An Hand der geschilderten Beispiele ist wohl einzusehen, daß eine Bereinigung der Terminologie im Hinblick auf den Kraftflug der Vögel angebracht ist. Ich halte es für schlechterdings unmöglich, mit einem Wort die aerodynamischen Besonderheiten einer Flugform erschöpfend zu charakterisieren. Diese müssen ausführlich analysiert und dargestellt werden. Dies ist bisher nur für wenige Arten überhaupt geschehen. Trotzdem besteht natürlich die Notwendigkeit, in anderen Zusammenhängen irgendwie die Flugweise eines Vogels zu benennen. Dann sollte das in Termini erfolgen, die das Verhalten des Tieres genügend charakterisieren, ohne (womöglich falsche) Aussagen über die Dynamik des Fluges zu machen. Ich möchte folgende Benennungen vorschlagen: a) Schnellflug oder Streckenflug. Damit ist der unbeschleunigte Horizontalflug gemeint, dessen Geschwindigkeit

allerdings in einem gewissen Spielraum (vom gewöhnlichen Reiseflug bis zum Fliegen mit Höchstgeschwindigkeit) variiert. Die Bezeichnung „freier Flug“ ist unangebracht. Mit diesem Wort kennzeichnet man besser den Flug „frei“ fliegender Tiere im Gegensatz zum Flug unter anderen Bedingungen (z. B. im Windkanal). b) Steigflug. c) Bremsflug oder Langsamflug. Mehr oder weniger horizontaler Kraftflug mit deutlich verminderter Geschwindigkeit gegenüber dem Schnellflug. Man erkennt ihn daran, daß die Körperlängssachse nicht in Flugrichtung weist, sondern mehr oder weniger stark aufgerichtet ist. d) Start. e) Landen oder Wassern. f) Rütteln. Flug auf der Stelle. g) Angedrückter Flug. Kraftflug mit abwärts geneigter Flugbahn, der mit länger anhaltender Beschleunigung verbunden ist.

Der Vollständigkeit halber seien noch h) Gleitflug und i) Segelflug genannt, die aber nicht in den Rahmen dieser Darstellung gehören und über deren Begriffsbestimmung keine Zweifel bestehen. Der Streckenflug mancher Vögel (z. B. Segler, Raubvögel, Störche) besteht in einem Wechsel zwischen Kraftflug- und Gleitflugabschnitten. Auch beim Streckenflug vieler kleiner Vögel (Kolibris, Spechte, Meisen, Finken, Rotschwänze u. a.) wechseln Antriebsphasen mit dem „Hinschießen“ mit angelegten Flügeln, woraus der mehr oder weniger ausgeprägte „Wellenflug“ resultiert.

Zusammenfassung

Um bestimmte Formen des Kraftfluges der Vögel aerodynamisch zu kennzeichnen, muß die Wirkung der von den schwingenden Flügeln erzeugten Luftpkräfte ermittelt werden. Es werden Verfahren beschrieben, wie auf der Grundlage von Zeitlupeaufnahmen und Geschwindigkeitsmessungen das Kräftepiel während eines Schlagzyklus dargestellt werden kann.

Hinsichtlich ihrer Luftkraftzeugung lassen sich zwei Formen des Flügelschlags unterscheiden. Bei der ersten wird der Schub oder Vortrieb nur während des Abschlages erzeugt, während bei der zweiten Ab- und Aufschlag Schub produzieren. Die beiden Modi des Flügelschlags werden an je einem Beispiel erläutert: dem Schnellflug der Nebelkrähe und dem Bremsflug der Haustaube.

Es wird erörtert, wo diese Schlagformen bei verschiedenen Vögeln vorkommen. Es wird dargelegt, daß es nicht möglich ist, die aerodynamischen Besonderheiten einer bestimmten Flugweise mit einem Wort zu charakterisieren. Sie müssen von Fall zu Fall untersucht und ausführlich dargestellt werden. Es wird daher eine Terminologie zur Bezeichnung verschiedener Formen des Kraftflugsgeschlagen, die das Flugverhalten des Vogels ausreichend kennzeichnet, aber auf aerodynamische Deutung verzichtet.

Summary

In order to determine the aerodynamic characteristics of particular types of the flapping flight of birds one must find out the effect of the forces produced by the flapping wing. Methods of representing the forces during the flapping cycle are described: they are based on slow motion pictures and speed measurements.

There are two types of wing-stroke with regard to the production of aerodynamic forces. In the first type, forward thrust is only produced by the downstroke, in the second type there is propulsion both in downstroke and upstroke. These two modes are exemplified by analyzing the fast flight of the Hooded Crow (first type) and the slow flight of the Domestic Pigeon (second type). The occurrence of the two modes in various birds is discussed.

The author points out that it is impossible to use only one term for explaining the aerodynamic characteristics of a particular mode of flight. These must be investigated in each case and described in detail.

A terminology which omits aerodynamic interpretations is proposed for describing a bird's flight behaviour.

Schrifttum

- Böker, H. (1931): Die Ableitung der Segelflugarten und des Schwingfluges der Vögel aus primärem Hubflug. Verh. anat. Ges. 71, 79—95. — Brown, R.H.J. (1948): The flight of birds (The flapping cycle of the pigeon). J. Exp. Biol. 25, 322—333. — Ders. (1951): Flapping flight. Ibis 93, 333—359. — Ders. (1953): The flight of birds (Wing function in relation to flight speed). J. Exp. Biol. 30, 90—103. — Demoll, R. (1930): Die Flugbewegungen bei großen und bei kleinen Vögeln. Z. Biol. 90, 199—230. — Flockebsbärt, O. (1932): Messungen an ebenen und gewölbten Platten. In: Erg. Aerodyn. Versuchsanst. Göttingen, 4. Liefg., Herausg. L. Prandtl und A. Betz. München und Berlin. — Greenewalt, C. H. (1960): Hummingbirds. Garden-City, N.Y. — Hertel, H. (1963): Struktur-Form-Bewegung (Biologie und Technik) Mainz. — Holst, E. von (1943): Über „künstliche“ Vögel als Mittel zum Studium des Vogelfluges. J. Orn. 91, 406—447. — Ders. (1953): Vogelflug. In: M. Hartmann, H. Bauer: Allgemeine Biologie, 4. Aufl., Stuttgart, p. 204—208. — Ders. und D. Küchemann (1941): Biologische und aerodynamische Probleme des Tierfluges. Naturwissenschaften 29, 348—362. — Jensen, M. (1956): Biology and physics of locust flight. III. The aerodynamics of locust flight. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. B 239, 511—522. — Jongbloed, J. (1938): Zur Aerodynamik des Vogelfluges. Z. vgl. Physiol. 25, 529—540. — Korschaysky, N. V. (1966): Über Reynolds-Zahlen beim Flug der Vögel. In: Flug- und Orientierungsmechanismen der Vögel, Herausg. Kleinenberg. Moskau (russisch). — Lack, D. (1956): Swifts in a Tower. London. — Langer, R., und R. Seifert (1935): Neuere Profiluntersuchungen. In: Erg. Aerodyn. Versuchsanst. Göttingen, 3. Liefg., Herausg. L. Prandtl u. A. Betz, 2. Aufl. München u. Berlin. — Lorenz, K. (1933): Beobachtetes über das Fliegen der Vögel und über die Beziehung der Flügel- und Steuerform zur Art des Fliegens. J. Orn. 81, 107—236. — Nachtagall, W. (1966a): Die Kinematik der Schlagflügelbewegungen von Dipteren. Methodische und analytische Grundlagen zur Biophysik des Insektenfluges. Z. vgl. Physiol. 52, 155—211. — Ders. (1966b): Profilmessungen am Taubenflügel. Z. vgl. Physiol. 52, 333—346. — Oehme, H. (1958): Die „Landung“ der Vögel. Beitr. z. Vogelk. 6, 251—261. — Ders. (1959): Untersuchungen über Flug und Flügelbau von Kleinvögeln. J. Orn. 100, 363—396. — Ders. (1963): Flug und Flügel von Star und Amsel. Ein Beitrag zur Biophysik des Vogelfluges und zur vergleichenden Morphologie der Flugorgane. Biol. Zbl. 82, 413—454; 569—587. — Ders. (1965a): Der Flug des Fahndendrongo. J. Orn. 106, 190—203. — Ders. (1965b): Über den Kraftflug großer Vögel. Beitr. z. Vogelk. 11, 1—31. — Oehmichen, E. (1950): Le vol des oiseaux. In: Traité de Zoologie, T. 15, Herausg. Grassé. Paris. — Pröll, A. (1951): Grundlagen der Aeromechanik und Flugmechanik. Wien. — Richter, W. (1959): Flugmechanik. Leipzig. — Schmitz, F. W. (1952): Aerodynamik des Flugmodells. 2. Aufl. Duisburg. — Stolpe, M., und K. Zimmer (1939 a): Der Schwingflug des Kolibri im Zeitlupefilm. J. Orn. 87, 136—155. — Dies. (1939b): Der Vogelflug. Seine anatomischen und physikalisch-aerodynamischen Grundlagen. Leipzig. — Stoer, J. H. (1948): The flight of birds analyzed through slow motion photography. Cranbrook Inst. Sci., Bull. 28. — Thienemann, J. (1930): Rossitten. 3. Aufl. Neudamm. — Weis-Fogh, T. (1956): Biology and physics of locust flight. II. Flight performance of the desert locust (*Schistocerca regaria*). Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. B 239, 459—510. — Zimmer, K. (1943): Der Flug des Nektarvogels (*Cinnyris*). J. Orn. 91, 371—387.