

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

## Über den Krafflug großer Vögel

Von HANS OEHME, Berlin

Mit 11 Abbildungen und 7 Tafeln

Herrn Prof. Dr. ERWIN STRESEMANN zum 75. Geburtstag gewidmet

Eingegangen 21. Jan. 1965

### Einleitung

Bei der Untersuchung des Fluges kleiner Singvögel war versucht worden, den Krafflug quantitativ darzustellen (OEHME 1963). Zeitlupenfilme von großen Vögeln zeigten, daß die Bewegungsvorgänge, vor allem des Flügelanschlags, verwickelter sind, als sie bisher beschrieben wurden, und daß es lohnend ist, den hiermit zusammenhängenden aerodynamischen Fragen nachzugehen. Das Filmmaterial erlaubte es, den unbeschleunigten Horizontalflug der Nebelkrähe (*Corvus corone cornix*) zu berechnen. Andere Vögel, von denen kein so umfangreiches Bildmaterial gewonnen werden konnte, wurden zum Vergleich herangezogen.

Für die wertvolle Unterstützung bei der Analyse der Zeitlupenfilme und für die mit großem Einfühlungsvermögen angefertigten Zeichnungen dieser Arbeit möchte ich dem wiss. Graphiker der Forschungsstelle, Herrn REINER ZIEGER, herzlich danken.

### Bisherige Darstellungen

DEMOLL (1930) hat die Flugbewegungen verschiedener Vögel beschrieben. Er vertritt die Ansicht, daß sich der Flügel größerer Vögel im Abschlag in zwei funktionell getrennte Abschnitte gliedert: Die Hand zeige eine starke Vorwindung und wirke als Propeller; der Arm werde „gegen den Wind angestellt“ und wirke als Tragfläche. Im Aufschlag werde der Handflügel gefaltet, und der Armflügel bleibe als gegen den Fahrtwind angestellte Tragfläche erhalten.

STOLPE und ZIMMER (1939) haben ein Schema der Kräfteverteilung während des Ab- und Aufschlages entworfen. In der Darstellung des Abschlages folgen sie im wesentlichen DEMOLL, für den Aufschlag nehmen sie an, daß auch der Handflügel zur Auftriebserzeugung dient.

STORER (1948) stimmt mit DEMOLL und STOLPE und ZIMMER überein, und auch im „Traité de Zoologie“ finden wir eine ähnliche Darstellung von OEHME

<sup>1</sup> BROWN nähert sich in einer weiteren Darstellung 1961 der Auffassung von STOLPE und ZIMMER über den Aufschlag.

CHEN (1950), wobei allerdings die Luftkraftherzeugung im Aufschlag als noch nicht eindeutig geklärt angesehen wird.

Nach BROWN (1951) erzeugt im Aufschlag nur der Armflügel den Auftrieb, und im Abschlagen entsteht vor allem an der Hand eine nach vorn oben gerichtete Luftkraft, die in Auftrieb und Schub zerlegt wird.<sup>1</sup>

Dies entspricht der klassischen Darstellung von HOLSTS (1943), der durch seine Modellversuche den Schwingenflug des Vogels des Geheimnisvoll-Rätschhaften entkleidete und zusammen mit KÜCHEMANN (VON HOLST und KÜCHEMANN 1941) die physikalischen Grundlagen zu seinem Verständnis dargelegt hatte. VON HOLST ist der Ansicht, daß der schnell fliegende große Vogel im Abschlagen nur den Handflügel (Auftrieb und viel Vortrieb), im Aufschlag nur den Armflügel (Auftrieb und wenig Rücktrieb) gebrauchte (s. Abb. 1). Die

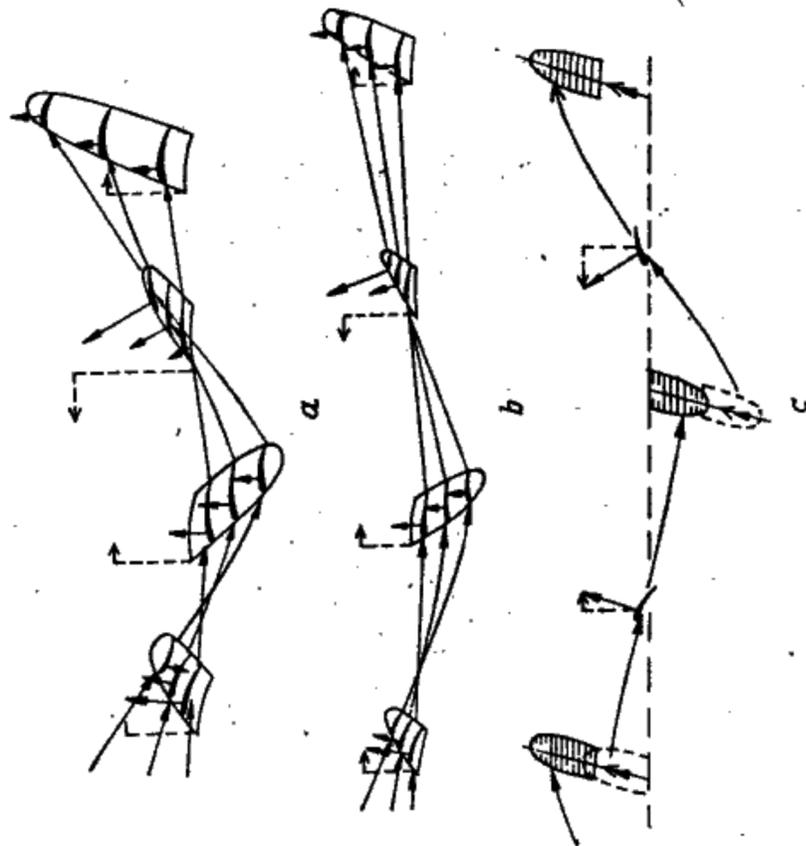


Abb. 1. Anblasrichtungen und Luftkräfte am Flügel des Schwingenmodells bei kleinem (a) und großem (b) Fortschrittsgrad und Schema der in Ab- und Aufschlag wirkenden Kräfte am Vogelflügel (c). Flugrichtung nach links. Nach von HOLST (1943)

jeweils nicht benötigte Flügelzone werde „kaltgestellt“, d. h. unter einem solchen Winkel angeblasen, daß keine aerodynamische Querkraft erzeugt wird. Für den Aufschlag trifft das genau zu, wie aus den vorgeführten Zeitlupenaufnahmen hervorgeht. (Ein Abwinkeln der Hand, welches von HOLST beim Vogel ausdrücklich betont, kann das Modell aus konstruktiven Gründen nicht durchführen.) Hingegen lassen die genannten Aufnahmen Zweifel an der Annahme aufkommen, daß die proximale Flügelzone im Abschlagen keine Querkraft erzeugen soll.

### Eigene Untersuchungen Methodik

Ausgewertet wurden Zeitlupenfilme von der Nebelkrähe, die mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 80 Bildern pro Sekunde hergestellt wurden. (Andere Vögel wurden zum Teil mit niedrigerer Bildfrequenz gefilmt.) Die Reihenbilder gestatten Aussagen über den Bewegungsablauf allgemein, über den Schlagwinkel  $\varphi$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Flügels oder eines Flügelteils. Für die Berechnung der Luftkräfte braucht man ferner die Fluggeschwindigkeit und die Maße des Vogels. Ausführlich sind die methodischen Fragen in meiner Arbeit über Amsel und Star (OEHME 1963) abgehandelt. Deshalb sollen auch die Grundlagen für die Berechnung des Fluges hier nur kurz zusammengefaßt werden.

Im Abschlagen wirken die Flügel wie Propellerblätter. Die Luftkräfte sind die eines Tragflügels gleicher Fläche, der mit der Anblasgeschwindigkeit  $w$  bei 70% der Flügellänge  $l$  (Abstand Schultergelenk—Flügelspitze des gestreckten

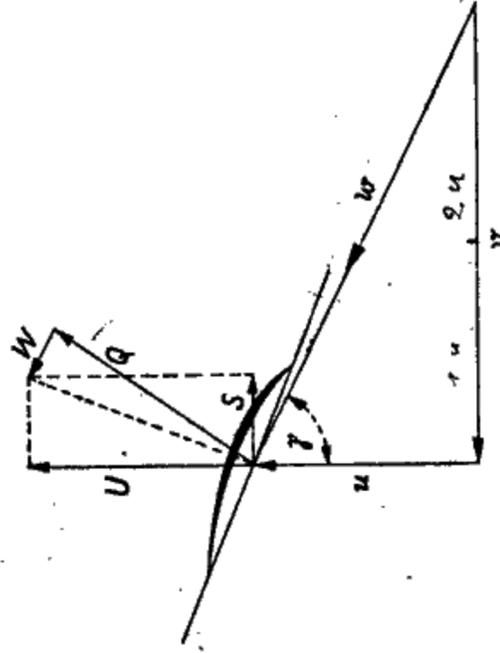


Abb. 2. Schema der Luftkräfte im Abschlagen.  $v$  = Fluggeschwindigkeit,  $u$  = Anblasgeschwindigkeit,  $w$  = Anblasrichtung,  $\gamma$  = Fortschrittswinkel,  $Q$  = Querkraft,  $W$  = Widerstand,  $U$  = Umfangskraft,  $S$  = Schub

Flügels) angeströmt wird. Aus der Fluggeschwindigkeit  $v$  und der Schlaggeschwindigkeit bei  $0,7 l$  ( $u_{0,7} = 0,7 \omega l$ ) ergeben sich der Fortschrittswinkel  $\gamma$  aus  $\frac{v}{u_{0,7}} = \operatorname{tg} \gamma$  und die Anblasgeschwindigkeit  $w = \sqrt{v^2 + u_{0,7}^2}$ . Die Querkraft ( $Q$ ) und der Widerstand ( $W$ ) ergeben sich aus Anblasgeschwindigkeit ( $w$ ), Flügelfläche ( $F$ ), Flügelstreckung ( $\Lambda$ ), Querkraftbeiwert ( $c_a$ ) und Profilwiderstandsbeiwert ( $c_{w_p}$ ).<sup>2</sup> Schub ( $S$ ) und Umfangskraft ( $U$ ) erhält man wie folgt:  $S = Q \cos \gamma - W \sin \gamma$ ;  $U = Q \sin \gamma + W \cos \gamma$ . Der während des gesamten Abschlages (bei zur Hori-

<sup>2</sup> Die senkrecht zur Anblasrichtung erzeugte Kraft nenne ich Querkraft. Die Bezeichnung Auftrieb, die sonst in der aerodynamischen Literatur dafür üblich ist (daher auch der Index  $a$  beim Querkraftbeiwert  $c_a$ ), wird nur für Kräfte verwendet, die lotrecht aufwärts wirken.

Der unbeschleunigte Horizontalflug der Nebelkrähe Ausgangswerte

Die Nebelkrähe fliegt mit einer Geschwindigkeit zwischen 45 und 50 km/h. Die mittlere Fluggeschwindigkeit  $v$  liegt bei  $13 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1} \approx 47 \text{ km/h}$ . Die Schlagfolge ist ziemlich regelmäßig. Im Durchschnitt erfolgen 4 Flügelschläge in der Sekunde. Der Abschlag währt recht konstant  $\frac{7}{80} \text{ sec}$ , der Aufschlag meist  $\frac{13}{80} \text{ sec}$ . Seine Dauer schwankt manchmal. Die Winkelgeschwindigkeit des Abschlages ist  $\omega = 18,15 \text{ sec}^{-1}$ .

Zwei frischtoote Tiere wogen 490 p bzw. 513 p. Es wird den Rechnungen ein angegebener Spielraum (440 bis 580 p) fällt. Die Gesamtflügelfläche ( $F$ ) beträgt  $0,134 \text{ m}^2$ , die Flügellänge ( $l$ )  $0,42 \text{ m}$ , der Abstand Schultergelenk—Handgelenk  $0,12 \text{ m}$ . Die Flügelprofile würden bei  $0,25 \text{ l}$ ,  $0,5 \text{ l}$  und  $0,7 \text{ l}$  aufgemessen (Abb. 4).

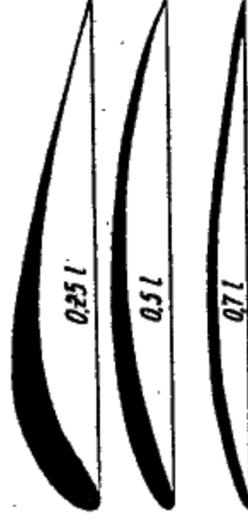


Abb. 4. Flügelprofile der Nebelkrähe (ausgeglichen)

Ihre Form stimmt weitgehend mit den bei Amsel und Star ermittelten Flügelquerschnitten überein (OEHME 1963). Somit können für die Berechnung wieder um die aerodynamischen Eigenschaften des Göttinger Profils 417 a verwendet werden. Die REYNOLDS-Zahl für die mittlere Flügeltiefe ( $\approx 0,16 \text{ m}$ ) liegt zwischen  $146000$  (Anblasgeschwindigkeit  $13 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ) und  $224000$  (Anblasgeschwindigkeit  $20 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ). In diesen Bereich fällt die von SCHMITZ (1952) ermittelte Polare für  $\text{Re} = 168000$ . Die Flügelstreckung  $\Lambda = \frac{s^2}{F}$  ( $s = \text{Spannweite}$ ) ist  $5,9$ . Nun endet die Flügelfläche außen aber nicht in einem glatten Randbogen, sondern die Hand bildet eine sogenannte Spaltflügelkaskade aus 6 hintereinander gestaffelten Teilstügel. (Das sind die „Vortriebsfedern“ genannten, verschmälerten Fahnenabschnitte der äußeren Handschwingen.) Ein Flügel mit unterteiltem Profil besitzt einen größeren maximalen  $c_a$ -Wert als ein solcher mit ungeteiltem Profil gleichen Gesamtumrisses (WIESELSBERGER 1923). In Abb. 5 sind die Polarkurven für  $\Lambda = \infty$ ,  $\Lambda = 6$ ,  $\Lambda = 5$  sowie eine geschätzte Kurve für  $\Lambda = 6$  bei vierfacher Unterteilung des Profils eingetragen. Im Bereich kleinerer  $c_a$ -Werte verläuft die Kurve für geteiltes Profil der Originalkurve etwa parallel: der Widerstand ist bei gleicher Querkraft größer. Erst bei großen Anstellwinkeln zeigt sich der Vorzug des Spaltflügels: relativ geringer Widerstand bei sehr großer Querkraft. Diese Besonderheit wird beim „gewöhnlichen“ Horizontalflug nicht in Anspruch genommen, sondern wird vor allem beim

zontalen symmetrischem Schlagwinkel  $\varphi$ ) wirkende mittlere Auftrieb ist

$$A = U \frac{2 \sin \frac{\varphi}{2}}{\varphi}$$

Im Aufschlag werden die in Frage kommenden Flügelteile wie eine Tragfläche behandelt. Allerdings muß dabei ihre Drehbewegung berücksichtigt werden, die zu einer Änderung der Anblasrichtung und -geschwindigkeit gegenüber einer starren Tragfläche führt. Ist die Winkelgeschwindigkeit des Aufschlages  $\omega$ , so ist die Aufschlaggeschwindigkeit  $u_\sigma = \sigma \omega l$ , wobei  $\sigma$  wieder ein bestimmter Prozentsatz der Flügellänge ist. Aus  $u_\sigma$  und  $v$  ergeben sich der Anstieg der Flugbahn gegenüber der Flugrichtung  $\frac{u_\sigma}{v} = \text{tg } \delta$  und die Anblasgeschwindigkeit  $w = \sqrt{v^2 + u_\sigma^2}$ . Die in der Schlagebene wirkende Kraft  $A'$  (virtueller Auftrieb,

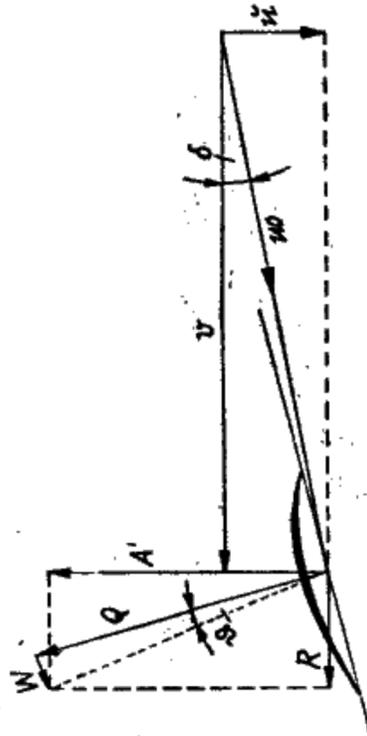


Abb. 3. Schema der Luftkräfte im Aufschlag.  $v =$  Fluggeschwindigkeit,  $u =$  Schlaggeschwindigkeit,  $w =$  Anblasgeschwindigkeit,  $\delta =$  Anstiegswinkel der Flugbahn,  $Q =$  Querkraft,  $W =$  Widerstand,  $A' =$  virtueller Auftrieb,  $R =$  Rücktrieb

er entspricht der Umfangskraft  $U$  des Abschlages) ist  $A' = \cos(\delta + \theta) \sqrt{Q^2 + W^2}$ , wo  $\theta$  gegeben ist durch  $\frac{c_w}{c_a} = \varepsilon = \text{tg } \theta$ . ( $c_w$  ist der Widerstandsbeiwert für eine endliche Flügelstreckung  $\Lambda$ ,  $c_{w\infty}$  ist der reine Profilwiderstandsbeiwert, gilt also für  $\Lambda = \infty$ .) Überstreicht der Flügel den gesamten Schlagwinkel  $\varphi$ , so ist der mittlere Auftrieb (analog den Verhältnissen im Abschlag)  $A = A' \frac{2 \sin \frac{\varphi}{2}}{\varphi}$ . Wird nur ein Teil des Schlagwinkels, z. B. zwischen den Winkeln  $\beta_1$  und  $\beta_2$ , durchlaufen, so gilt allgemein  $A = A' \frac{\sin \beta_1 - \sin \beta_2}{\beta_1 - \beta_2}$ , wobei  $\beta_1$  und  $\beta_2$  nicht als absolute Winkelgrößen (von der Horizontalen aus gemessen) gebraucht werden, sondern unter Berücksichtigung des Vorzeichens, wenn alle Winkel von der Horizontalen aus nach oben positiv, nach unten negativ gezählt werden. Dann ist der größtmögliche Winkel  $+\frac{\varphi}{2}$ ; der kleinste  $-\frac{\varphi}{2}$ , und die Formel für den gesamten Schlagwinkel ergibt sich als Sonderfall. Den Rücktrieb erhält man zu  $R = \sin(\delta + \theta) \sqrt{Q^2 + W^2}$ .

Start ihre Bedeutung erlangen: großer Anblenwinkel—geringe Anblasgeschwindigkeit (vgl. OEHME 1963). Im folgenden wird so gerechnet, als ob die Flügelstreckung  $\Lambda = 5$  vorläge. Der Widerstand ( $c_w = c_{wp} + c_{wi}; c_{wi} =$  Beiwert des induzierten Widerstandes) wird also etwas größer angenommen, als er für die tatsächliche Flügelstreckung sein dürfte, wenn kein Spaltflügel in der Hand ausgebildet wäre.

#### Ergebnisse

Betrachten wir den Ablauf eines Flügelschlages (Abb. 6 u. 7), so sehen wir im Abschlag nichts Besonderes. Er verläuft in einem Zuge. Die leichte Krümmung der Bahn nach vorn kann vernachlässigt werden:  $u$  steht senkrecht auf  $v$ . Der Aufschlag vollzieht sich in vier einigermaßen abgrenzbaren Etappen, in denen vorwiegend entweder der Arm oder die Hand bewegt werden. Der Armflügel bewegt sich auch hier senkrecht zur Flugrichtung. Das Vorziehen des Handgelenkes in der zweiten Hälfte der Aufschlagsbewegung kann ebenfalls

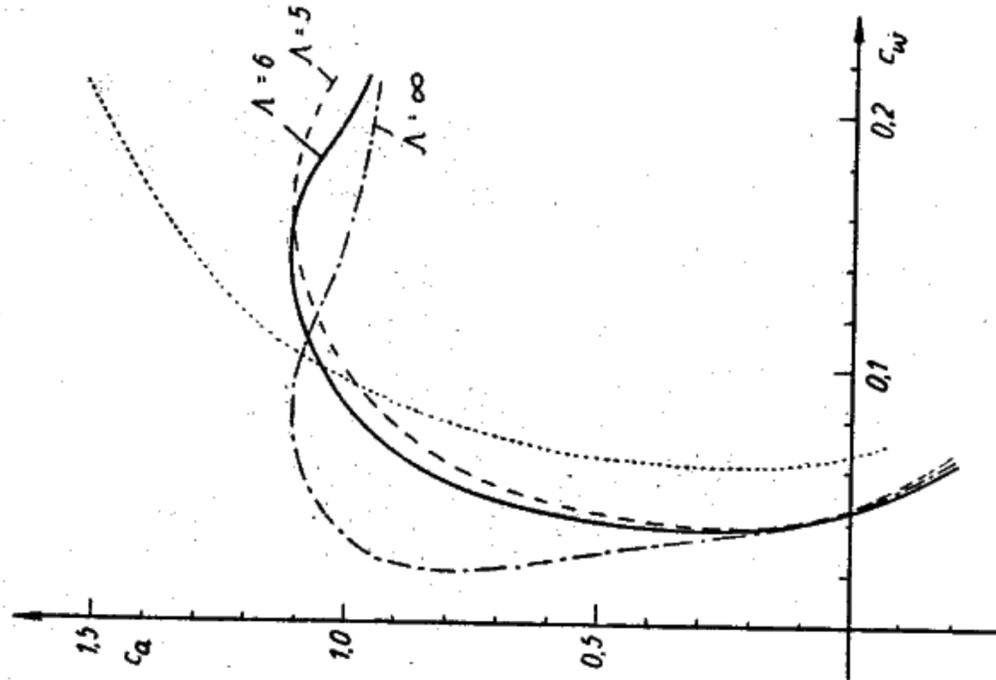


Abb. 5. Polaren des Profils G 417a bei  $Re = 168000$ . Nach Angaben aus SCHMITZ (1958). Fein-punktiert: Geschätzte Kurve für vierfach unterteiltes Profil

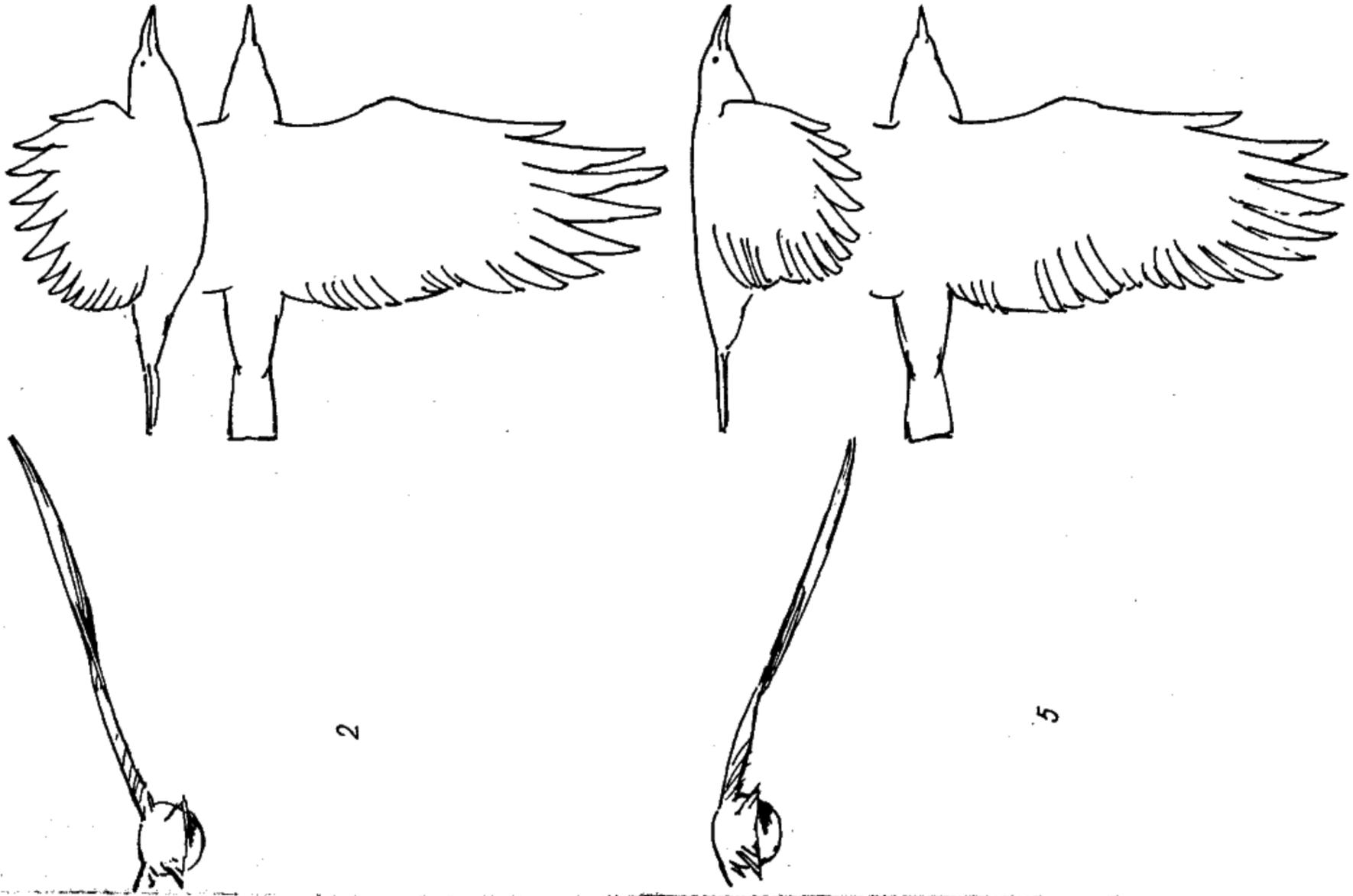


Abb. 6 a



9



11



Abb. 6 b

Abb. 6. Flügelstellungen in Ab- und Aufschlag (Zeichnungen nach Zeitlupenfilmen). Die Zahlen geben die Zeit in Achtzigstelsekunden nach Beginn des Abschlages an



13



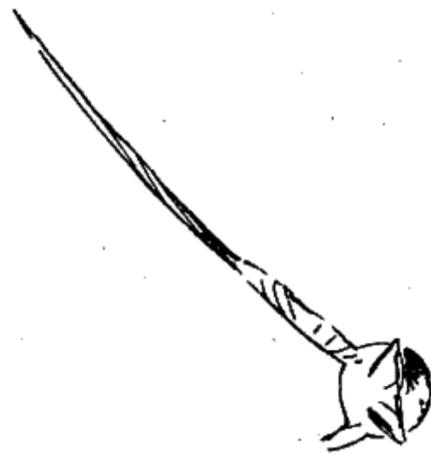
15



Abb. 6 c



18



20

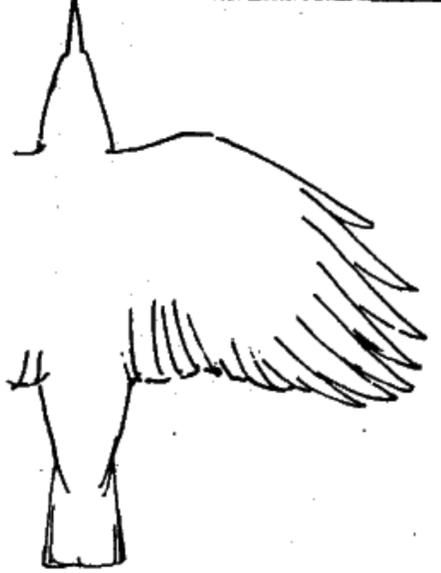


Abb. 6 d

vernachlässigt werden. Lediglich das Strecken der Hand gegen Ende des Aufschlages verläuft schräg zur Flugrichtung.

Im Abschlag wird der gesamte Flügel von vorn unten angeblasen. Um den proximalen Flügelabschnitt „kaltzustellen“, müßte er unter einem negativen

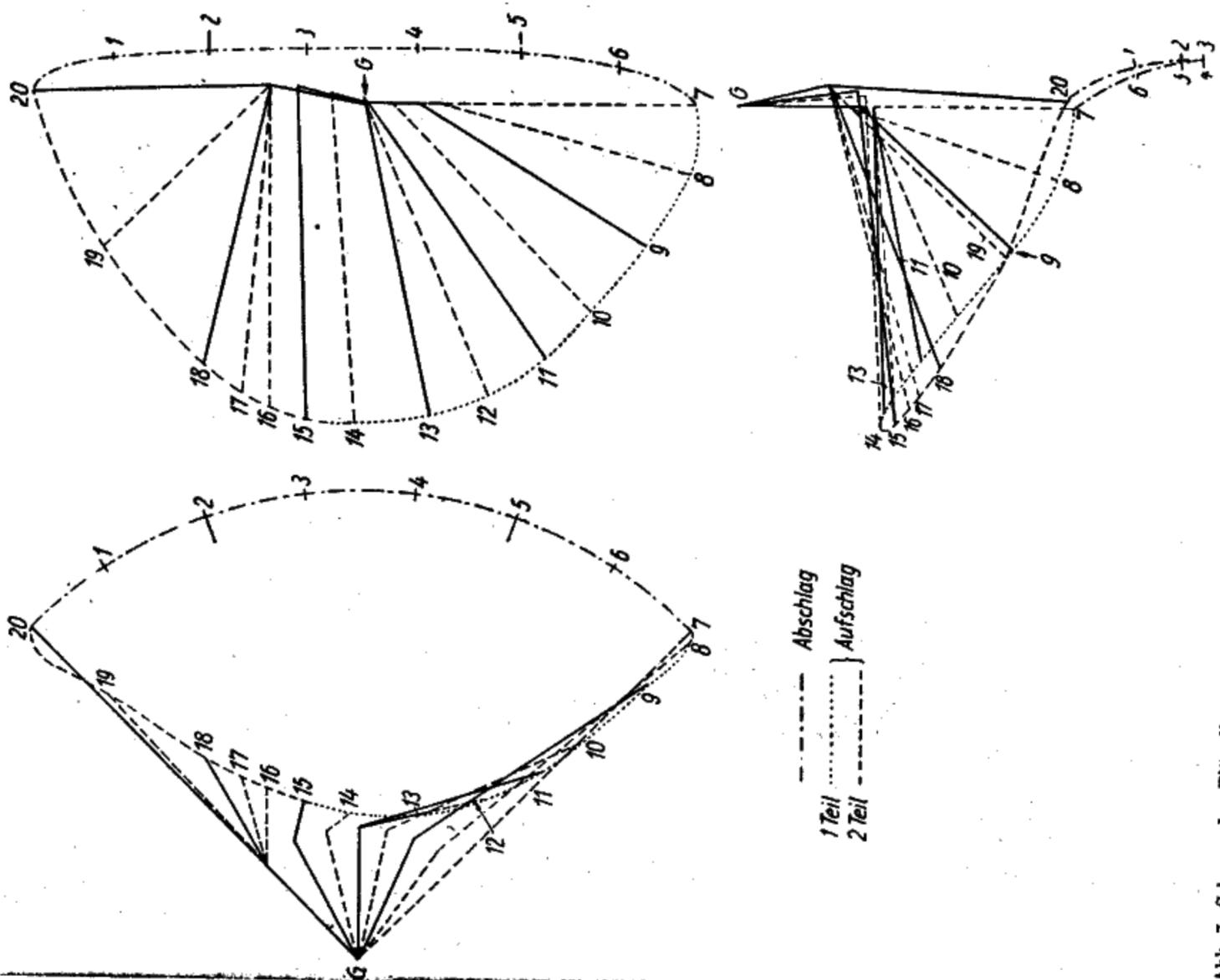


Abb. 7. Schema der Flugbewegung während eines Flügelschlages. Angegeben sind die Bahnkurve der Flügelspitze und, durch Striche vereinfacht dargestellt, die Stellung des Flügels, wobei die Phasen der Abb. 6 durch starke Strichführung hervorgehoben sind. Bedeutung der Zahlen wie in Abb. 6. G = Lage des Schultergelenkes

Anstellwinkel von mindestens  $3^\circ$  angeströmt werden. Das würde verlangen, daß die Profilsehne bei  $0,25\text{ l}$  um etwa  $12^\circ$  gegen die Flugrichtung nach vorn unten geneigt sein müßte, was tatsächlich nicht der Fall ist. Mit  $v = 13\text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  und  $u_{0,7} = 5,34\text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  erhält man bei  $c_a = 0,75$  und  $c_{wp} = 0,026$  ( $c_w = 0,059$ ):

$Q = 1,242\text{ kp}$ ;  $W = 0,098\text{ kp}$ ;  $U = 1,186\text{ kp}$ ;  $A = 1,07\text{ kp}$ ;  $S = 0,381\text{ kp}$ .

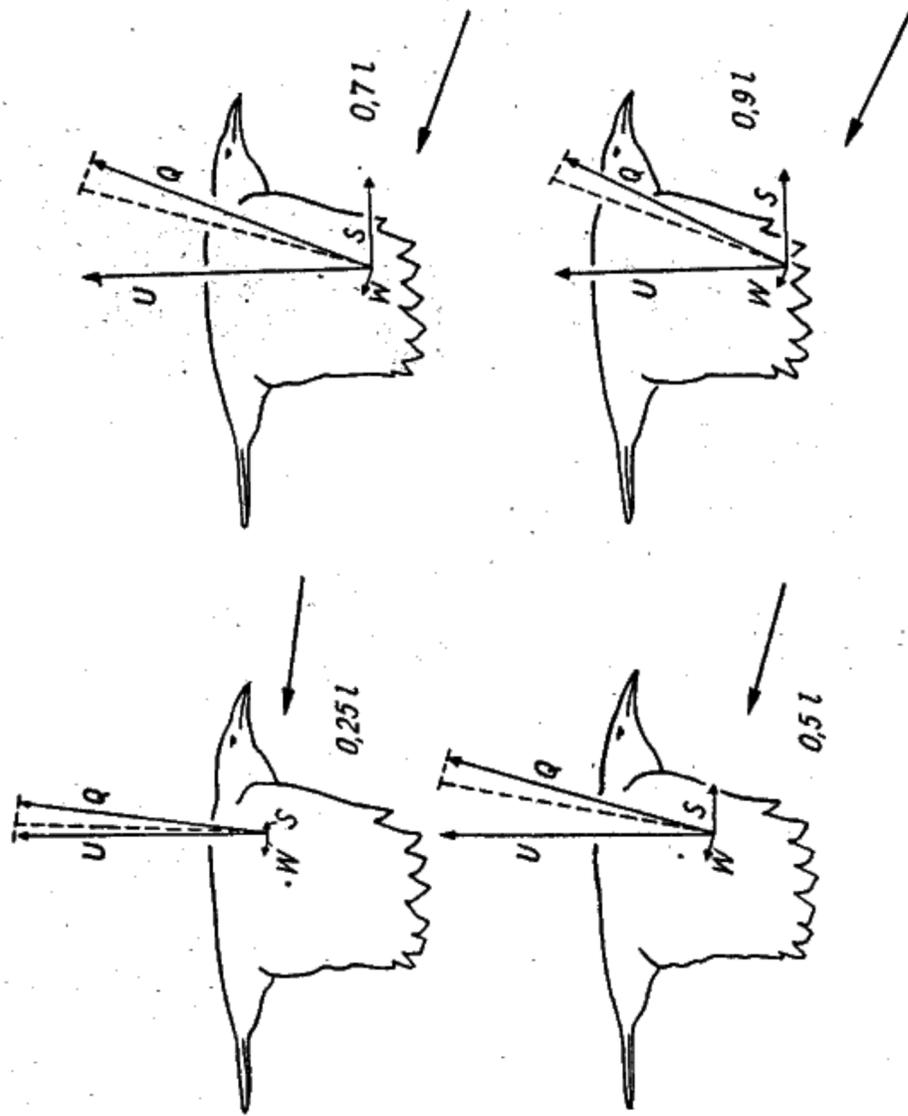


Abb. 8. Schema der Anblasrichtungen und der Luftkräfte im Abschlag für vier Flügelquerschnitte. Bezeichnungen wie in Abb. 2. Der Übersichtlichkeit halber ist nicht die Horizontalstellung des Flügels dargestellt worden, für die die Konstruktion der Vektoren gilt.



Abb. 9 a. Schema von Anblasrichtung und Luftkräften im Aufschlag (I). Bezeichnungen s. Abb. 8

In der ersten Phase des Aufschlages wird die Hand nach hinten parallel zum Körper abgewinkelt. Gleichzeitig hebt sich der Arm in die Waagrechte. Der Handflügel ist so eingestellt, daß er keine Querkraft und nur den unvermeidbaren Widerstand liefert. Gleichzeitig übernimmt er eine wichtige Aufgabe: Die Flügelstreckung des tragenden Armeiles ist gering ( $\Lambda \approx 2$ ). Das würde einen sehr hohen induzierten Widerstand nach sich ziehen. Bringt man aber an Flügel mit geringer Streckung genügend große sogenannte Endscheiben an, so kann der induzierte Widerstand auf weniger als 50% erniedrigt werden (PRANDTL 1935). In unserem Falle kann man annehmen, daß die  $c_w$ -Werte wie bei  $\Lambda = 5$  auch für den Arm allein gelten. Diese Endscheibenfunktion behält die Hand in den ersten drei Phasen des Aufschlages.

Ausgangswerte für den ersten Aufschlagsabschnitt:  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $t_1 = \frac{4}{80}\text{ sec}$ ,  $\omega_1 = 15,7\text{ sec}^{-1}$ ,  $\sigma = 0,2 \cdot (0,2\text{ l} \cong 70\% \text{ der Armlänge})$ ,  $u_{1,0,2} = 1,32\text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ,  $v = 13\text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ , Armflügelfläche  $F_A = 0,04\text{ m}^2$ . Mit  $c_a = 0,25$  und  $c_w = 0,04$

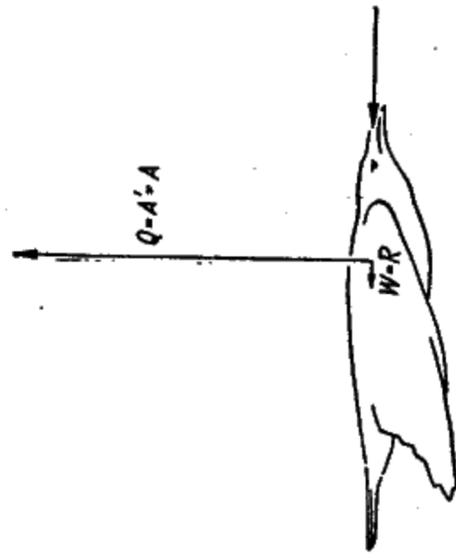


Abb. 9 b. Schema von Anblasrichtung und Luftkräften im Aufschlag (II)

ergibt sich:  $Q_1 = 0,107\text{ kp}$ ;  $W_1 = 0,017\text{ kp}$ ;  $A_1 = 0,105\text{ kp}$ ;  $A_1 = 0,091\text{ kp}$ ;  $R_1 = 0,028\text{ kp}$ .

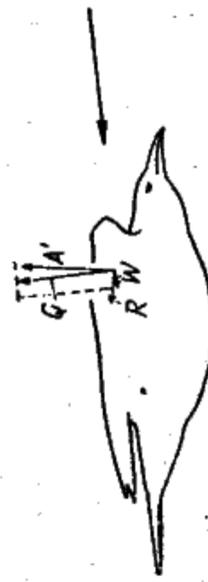


Abb. 9 c. Schema von Anblasrichtung und Luftkräften im Aufschlag (III)

In der nun folgenden Phase 2 bleibt der Armflügel waagrecht stehen:  $t_2 = \frac{2}{80}\text{ sec}$ ,  $v = 13\text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ,  $c_a = 0,9$ ,  $c_w = 0,08$ .  $Q_2 = A_2 = 0,380\text{ kp}$ ;  $W_2 = R_2 = 0,034\text{ kp}$ .

Nunmehr wird der Arm in der dritten Phase in die für den Beginn des nächsten Abschlages erforderliche Stellung gebracht:  $\varphi_3 = 45^\circ$ ,  $t_3 = \frac{3}{80}$  sec,  $\omega_3 = 20,95 \text{ sec}^{-1}$ ,  $\sigma = 0,2$ ,  $u_{3,0,2} = 1,76 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ,  $v = 13 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ,  $c_a = 0,25$ ,  $c_w = 0,04$ ,  $Q_3 = 0,408 \text{ kp}$ ;  $W_3 = 0,017 \text{ kp}$ ;  $A'_3 = 0,104 \text{ kp}$ ;  $A_3 = 0,094 \text{ kp}$ ;  $R_3 = 0,031 \text{ kp}$ .

Die vierte Phase des Aufschlages ist verwickelter. Während der Arm in seiner erreichten Stellung stehenbleibt, wird die Hand aus ihrer abgewinkelten Haltung zurück in die Streckstellung gebracht. Die Hand gibt jetzt ihre Endscheibenfunktion auf, aber im gleichen Maße „verlängert“ sie den tragenden Armteil, wird dabei selbst aber noch so angeblasen, daß nur Widerstand, keine Querkraft entsteht. Ein Anwachsen des induzierten Widerstandes am Armflügel

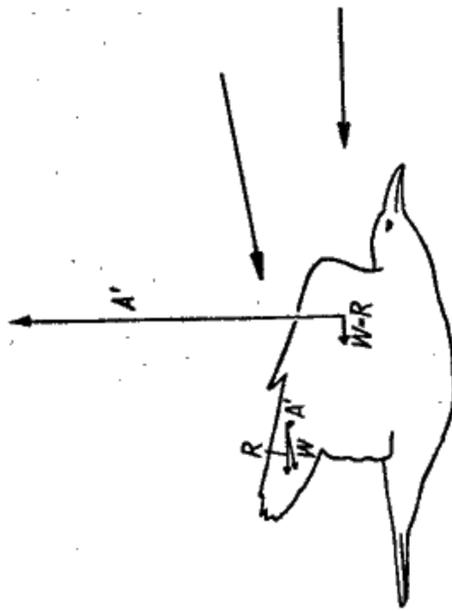


Abb. 9 d. Schema von Anblasrichtungen und Luftkräften im Aufschlag (IV)

ist deshalb nicht zu erwarten. Die Hand wird während der Entfaltung in einem mittleren Anstiegswinkel von  $10^\circ$  gegen die Flugrichtung nach außen oben geführt und dabei mit etwa  $18 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  angeblasen. Die bei dieser Bewegung des Handflügels wirksame Fläche kann mit  $75\%$  der Handflügelfläche ( $F_H = 0,094 \text{ m}^2$ ) angesetzt werden.  $t_4 = \frac{4}{80}$  sec. Am Armflügel erhalten wir mit  $c_a = 0,9$ ,  $c_w = 0,08$ :  $Q_4 = A'_{4A} = 0,380 \text{ kp}$  und daraus wegen der  $45^\circ$ -V-Stellung  $A_{4A} = 0,268 \text{ kp}$ ;  $W_{4A} = R_{4A} = 0,034 \text{ kp}$ . An der Hand ergibt sich mit  $c_a = 0$ ,  $c_w = 0,05$ :  $W_{4H} = 0,072 \text{ kp}$ . Wegen der Bahnsteigung hat  $W_{4H}$  eine Rücktriebskomponente  $R_{4H} = W_{4H} \cos 10^\circ = 0,071 \text{ kp}$  und eine Abtriebskomponente  $A'_{4H} = W_{4H} \sin 10^\circ = 0,012 \text{ kp}$ . Wegen des ebenfalls durchlaufenen „Aufschlagswinkels“ von  $\approx 45^\circ$  vermindert sich der virtuelle Abtrieb  $A'_{4H}$  auf den wirklichen mittleren Abtrieb  $A_{4H} = 0,011 \text{ kp}$ . Insgesamt sind also die erzeugten Kräfte:  $A_4 = 0,257 \text{ kp}$ ;  $R_4 = 0,105 \text{ kp}$ .

Für den unbeschleunigten Horizontalflug müssen im zeitlichen Mittel die Kräfte in horizontaler (Schub und Rücktrieb) und vertikaler (Auftrieb und Gewicht) Richtung einander ausgleichen oder, was dasselbe ist, müssen während eines vollen Flügelschlages jeweils die Impulse (Produkte Kraft · Zeit) in hori-

zontaler bzw. vertikaler Richtung die Summe Null haben. Wir geben allen nach oben und vorn wirkenden Kräften das Vorzeichen +, den entgegengesetzt wirkenden das Vorzeichen -. Wir nehmen weiter einen auf die Flügelfläche bezogenen Rumpfwiderstandsbeiwert  $c_{wK} = 0,07$  wie bei der Amsel (s. OEHME 1963) an und erhalten für  $v = 13 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$   $W_K = 0,099 \text{ kp}$ .

a) Vertikale Kräfte	P (kp)	t (sec · 80 <sup>-1</sup> )	80 · P · t
A	1,070	7	7,490
A <sub>1</sub>	0,094	4	0,376
A <sub>2</sub>	0,380	2	0,760
A <sub>3</sub>	0,094	3	0,282
A <sub>4</sub>	0,257	4	1,028
G	-0,500	20	-10,000
		$\Sigma$ 80 · P · t =	- 0,064

Der mittlere Auftrieb ist  $\bar{A} = 0,497 \text{ kp}$ , dem das Gewicht  $G = -0,5 \text{ kp}$  gegenübersteht.

b) Horizontale Kräfte

S	0,381	7	2,667
W <sub>K</sub>	-0,099	20	-1,980
R <sub>1</sub>	-0,028	4	-0,112
R <sub>2</sub>	-0,034	2	-0,068
R <sub>3</sub>	-0,031	3	-0,093
R <sub>4</sub>	-0,105	4	-0,420
		$\Sigma$ 80 · P · t =	- 0,006

Der mittlere Vortrieb ist  $\bar{S} = 0,133 \text{ kp}$ . Ihm steht der mittlere Rücktrieb (Widerstand)  $\bar{R} = -0,134 \text{ kp}$  gegenüber.

Man kann die Kräfte als praktisch ausgeglichen ansehen. Mit ihnen lassen sich die Beschleunigungen und mit diesen die Geschwindigkeits- und Höhenänderungen während eines vollen Flügelschlages annähernd bestimmen. Die Geschwindigkeit schwankt um  $\approx 4\%$  zwischen  $12,75 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  am Ende des Aufschlages und  $13,25 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  am Ende des Abschlages. Diese geringe Schwankung ist am fliegenden Vogel nicht mit den gewöhnlichen Hilfsmitteln festzustellen. (Für eine ganz exakte Kräfteberechnung hätte man natürlich die veränderliche Horizontalgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Für die hier angestrebten Näherungswerte, die in erster Linie eine Vorstellung von der ungefähren Größe der wirkenden Kräfte geben sollen, genügt es, wenn mit einer gleichbleibenden Fluggeschwindigkeit gerechnet wird.) Neben der Geschwindigkeitsschwankung tritt noch eine Höhenänderung um reichlich  $3 \text{ cm}$  auf. Der Schwerpunkt des Vogels liegt am Ende der ersten Aufschlagsphase am höchsten, am Ende des Aufschlages am tiefsten. Auch diese Schwankung — sie beträgt knapp  $1\%$  der in  $\frac{1}{4}$  sec zurückgelegten Strecke — ist nicht bemerkbar.

Schließlich sollen noch einige Kenngrößen angeführt werden, die das Bild vom Flug der Nebelkrähe abrunden:

$$\text{Fortschrittsgrad } \lambda = \frac{v}{u} = 0,7 \lambda_{0,7} = 1,7.$$

Der Fortschrittsgrad wird nur auf den Abschlag bezogen, da nur hier die Propellerwirkung des Flügels auftritt.

$$\text{Schubwirkungsgrad des Abschlages } \eta = \frac{\bar{s} \cdot v}{U \cdot u_{0,7}} = 0,783.$$

Mit dem mittleren Schub ( $\bar{S}$ ) erhält man den Schubbeiwert  $c_s = \frac{\bar{s} \cdot 16}{F \cdot v^2} = 0,094$

$$\text{und das Verhältnis Auftrieb: Vortrieb } \frac{G}{\bar{S}} \approx \frac{A}{\bar{S}} = 3,75.$$

Während des Abschlages leistet die Flugmuskulatur  $N = U \cdot u_{0,7} = 6,32 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ . Die Durchschnittsleistung des Horizontalfluges (unter Vernachlässigung der Aufschlagsarbeit) ist dann  $\bar{N} = N \cdot \frac{7}{20} = 2,21 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0295 \text{ PS}$ .

Diskussion

Bei der Betrachtung der Flugbewegung der Krähe, aber auch der anderer großer Vögel (s. Taf. I—VII) ergeben sich mehrere wichtige Hinweise. Im Abschlag arbeitet der Flügel nicht in funktionell getrennten Abschnitten, sondern er wirkt als Propellerblatt bei sehr großem Fortschrittsgrad, wobei natürlich am proximalen Flügelteil der Schub verschwindend klein wird. Die inneren Flügelabschnitte werden auch nicht unter Vermeidung einer Querkraft angeströmt, da das ein starkes Vordrehen des Armes erforderlich machte, was auch aus anatomischen Gründen unmöglich ist. Im Aufschlag wirkt zwar nur der Armflügel als Tragfläche, aber die Hand kann trotzdem nicht entbehrt werden, da sie zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse (Endscheibenwirkung) gebraucht wird. Der Armflügel erreicht lange vor der Hand die Ausgangsstellung für den neuen Abschlag; aber erst, wenn der gesamte Flügel wieder voll entfaltet ist, wird die neue Abschlagsbewegung eingeleitet.

Mit dem hier durchgeführten Rechenverfahren kann man Näherungswerte für die erzeugten Luftkräfte und ihre Auswirkung erhalten, die m. E. besser für die Beurteilung des Kraftfluges geeignet sind als allgemeine Angaben über die Tatsache, daß die Flügel Auftrieb und Vortrieb erzeugen. Nun sind als Ausgangswerte nur die Geschwindigkeiten des Vogels und des schlagenden Flügels gegeben. Die Beiwerte  $c_a$  und  $c_w$  wurden so verwendet, wie sie durch die Polare des Profils G 417 a gegeben sind. Zwar stimmen die Flügelprofile der Krähe nicht alle genau mit der gewölbten Platte G 417 a überein, aber ein Vergleich der Polaren dünner Profile (Abb. 11) ergibt, daß die Querkraft- und Widerstandsverteilung bei mittleren Anstellwinkeln sehr ähnlich ist. Obwohl die Kurven bei einer hohen REYNOLDS-Zahl (420000) gewonnen wurden, dürften sie wegen der großen „Kennzahlunempfindlichkeit“ solcher Profile (SCHMITZ 1952) auch bei niedrigerer Re-Zahl ähnlich aussehen. Eine Betrachtung der Kurvenschar zeigt noch mehr: Nach der Form der Flügelprofile (Abb. 4) zu urteilen.

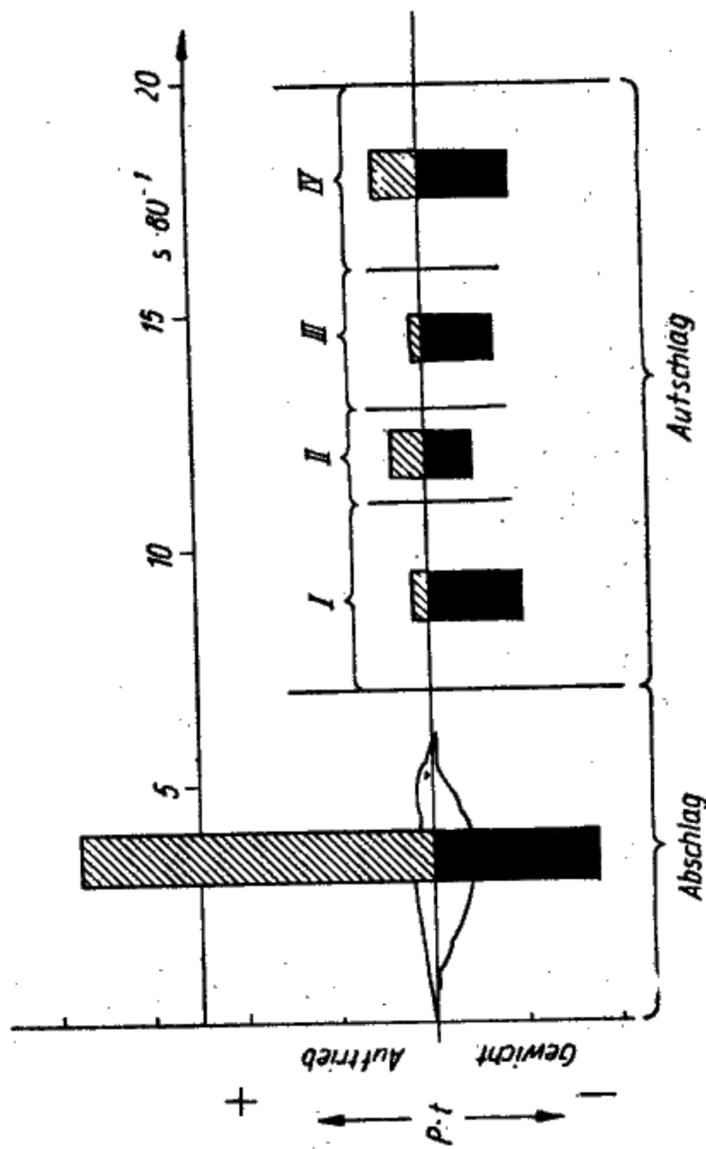


Abb. 10 a. Schema der Impulsgrößen der vertikalen Kräfte (s. Text)

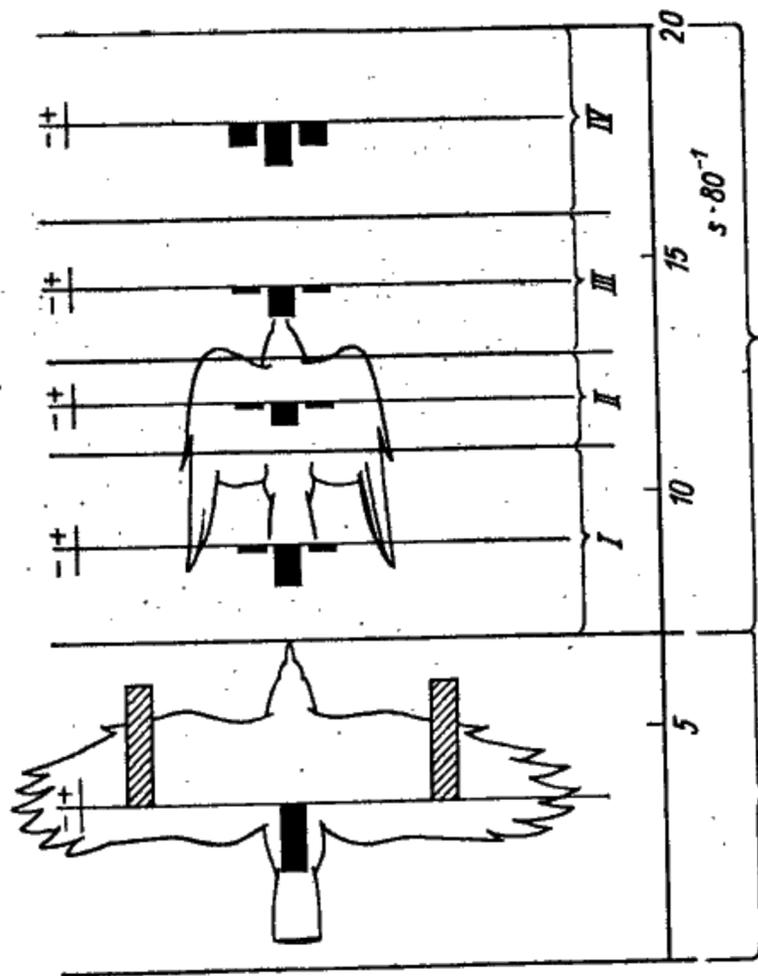


Abb. 10 b. Schema der Impulsgrößen der horizontalen Kräfte (s. Text)

ist der Widerstand des äußersten Flügelabschnittes etwas kleiner, der des innersten größer als der des angenommenen „mittleren Profils“ 417 a. Allerdings kommt die Widerstandserhöhung durch die Spaltflügelkaskade der Hand hinzu. Weiter wäre bei eindeutiger Gültigkeit des Profils G 464 für den Armflügel der

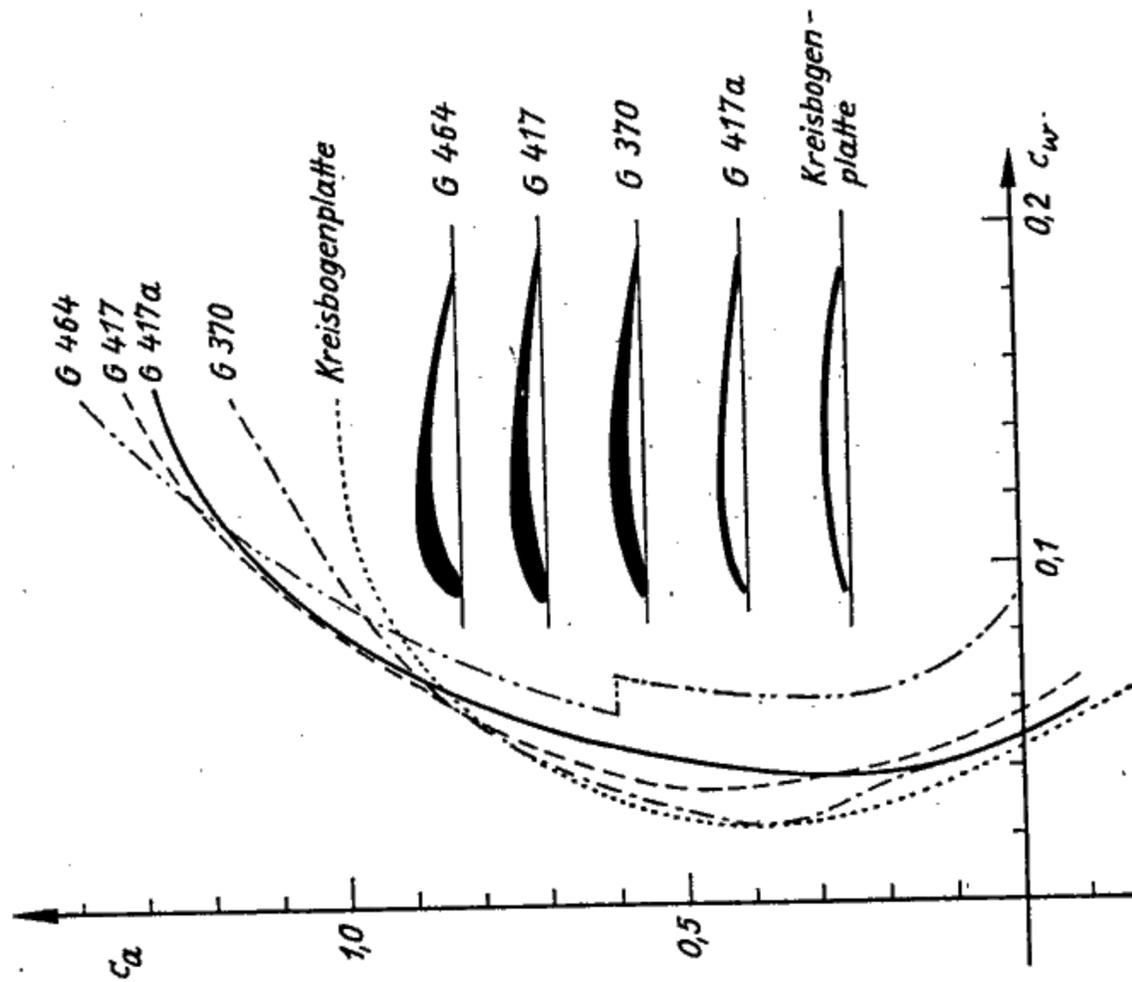


Abb. 11. Polaren dünner, gewölbter Profile bei  $Re = 420000$  für  $\lambda = 5$ . Nach FLACHSBART (1932), LANGER & SEIFERTH (1935) u. WIESSLSBERGER (1936)

Widerstand im Aufschlag zu gering angesetzt worden. Leider ist das Profil 464 nie bei kleineren  $Re$ -Zahlen vermessen worden. Eine experimentelle Bestimmung der Beiwerte der Vogelflügel ist also für genauere Rechnungen unumgänglich. In unserem Falle müssen die genannten Unsicherheiten in Kauf genommen werden. Ein grundsätzlicher Fehler entsteht durch die Verwendung des Profils 417 a für den ganzen Flügel wohl nicht.

Die „passenden“  $c_d/c_w$ -Paare müssen nun durch Probieren gefunden werden, da die Anblasewinkel nicht zu bestimmen sind. Ich glaube jedoch, daß auch die Tatsache den Wert eines guten Modellversuches hat, daß man mit den gemessenen Geschwindigkeiten und einer durch Formvergleich wahrscheinlichen Flügelpolare Luftkräfte berechnen kann, die mit diesen Ausgangswerten harmonieren. Man kann natürlich nicht behaupten, daß der Vogel genauso fliegt, wie es die Rechnungen angeben, aber man kann wohl annehmen, daß die tatsächlichen Kraftwirkungen den hier dargestellten nahekommen.

Mit dieser Einschränkung soll versucht werden, andere Vorstellungen über die Flugbewegung und die Luftkraftezeugung mit den hier vorgetragenen Befunden zu vergleichen. Ersetzt man den in vier Abschnitten verlaufenden Aufschlag durch die Bewegung „in einem Zuge“, wie sie VON HOLST (1943) annimmt, so ergibt sich die gleiche Kräftebilanz. Die Kräfte des Abschlages werden wie bisher angenommen:  $A = 1,07$  kp und  $S = 0,381$  kp. Beim Aufschlag durchläuft der Armflügel dann in  $\frac{13}{80}$  sec den Winkel von  $90^\circ$  und hat folglich die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 9,66 \text{ sec}^{-1}$ . Die Aufschlaggeschwindigkeit ist  $u_{0,2} = 0,812 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ . Der Anstieg der Flugbahn gegen die Flugrichtung ist  $\delta = 3,57^\circ$  nach  $\text{tg } \delta = \frac{u_{0,2}}{v}$ . Mit  $c_a = 0,5$  und  $c_w = 0,049$  erhält man  $\text{tg } \theta = 0,088$  und  $\theta = 5,03^\circ$ , weiter  $Q = 0,212$  kp,  $W = 0,019$  kp,  $A = 0,189$  kp und  $R = 0,032$  kp. Für die letzte Aufschlagsphase (Strecken des Handflügels,  $t = \frac{4}{80}$  sec) ist noch der zusätzliche Rücktrieb von  $0,07$  kp einzusetzen. Danach steht dem Gewicht  $G = -0,5$  kp ein mittlerer Auftrieb  $A = 0,497$  kp gegenüber, dem mittleren Rücktrieb  $\bar{R} = -0,135$  kp der mittlere Schub  $\bar{S} = 0,133$  kp. Da Geschwindigkeits- und Höhengschwankung die gleichen Beträge haben, wie auf S. 15 angegeben, so bedarf es einer Erklärung, warum der Vogel diesen Aufschlagsmodus nicht anwendet.

Im Aufschlag greift am Armflügel der virtuelle Auftrieb  $A'$  an, der ihn nach oben drehen will. Wirkt keine Kraft entgegen, würden die Flügel nach Aufhöhen des Muskelzuges des Abschlages einfach nach oben zusammenklappen. Die gesamte erzeugte Luftkraft  $A'$  würde nur zu diesem Effekt führen, und eine Auftriebszeugung wäre unmöglich. Außerdem vollzöge sich dieser „Aufschlag“ in sehr kurzer Zeit. Tatsächlich wird der Flügel aber relativ langsam nach oben geführt. Es wäre nun denkbar, daß der Flügelsenker der hochdrehenden Kraft so stark entgegenwirkt, daß der Aufschlag entsprechend verlangsamt wird. Das wäre der ideale „passive Aufschlag“, wie ihn z. B. BROWN (1951) annimmt. Das würde aber bedeuten, daß die erzeugte Querkraft etwas größer sein müßte als die für den erforderlichen Auftrieb nötige. Und das wiederum müßte zu einer Vergrößerung des Widerstandes, somit auch zu einer Vergrößerung des Rücktriebes führen, was einen zu seiner Überwindung nötigen größeren Schub im Abschlag erforderte. Es wäre daher günstiger, wenn der Flügel durch das Zusammenwirken von Flügelsenkern und Flügelsenkern seine langsame Aufschlagbewegung erhält, die Bewegung also gerade nicht durch aerodynamische

Kräfte (BROWN 1951) bewirkt wird. Es ist jedoch noch ein weiterer Punkt zu berücksichtigen. Wie wir gesehen haben, erreicht der Arm geraume Zeit vor Beginn des nächsten Abschlags seine hierfür erforderliche Ausgangsstellung und wird dann so fixiert, bis die Abduktoren die Hand „nachgeholt“ haben (Aufschlagsabschnitt 4). Ich möchte diese Tatsache besonders hervorheben (vgl. Taf. I—VII) und so deuten, daß hier der Pectoralis das erforderliche Refraktärstadium hat. In diesem nötigen Refraktärstadium liegt der Unterschied zwischen dem hintereinander ablaufenden Gummimotor der von HÖLSTschen Schwingenmodelle und der Flugmuskulatur des Vogels. Die von DEMOLL (1930) vertretene Auffassung, das Handgelenk eile der Abschlagsbewegung der Flügelspitze voraus, ist wohl auf Grund der vorliegenden Befunde zu korrigieren. DEMOLLS Reihenbilder stammen aber auch gar nicht vom wirklich „freien“ Flug im Sinne des Fluges mit normaler Reisegeschwindigkeit, sondern es handelt sich um stark verlangsamten Flug, Abflug o. ä.

Wenden wir uns nun der Frage zu, ob der Vogel auch so fliegen könnte, wie STOLPE und ZIMMER (1939) es darstellen. Nach diesen Autoren soll der Auftrieb in Ab- und Aufschlag gleich bleiben, d. h. die Größe des Gewichtes haben. Außerdem soll die gesamte Flügelfläche im Aufschlag als Auftriebszeuger wirken. Ein Aufschlag, der die geforderte Bedingung  $A = -G$  erfüllt, wäre zu verwirklichen. Die Rechnung erfolgt, wie für den Aufschlag bei voll entfaltetem Flügel, für  $0,7 l$ . Bei  $\omega = 9,66 \text{ sec}^{-1}$  (kontinuierlicher Aufschlag) ist  $u_{0,7} = 2,84 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  und  $\text{tg } \delta = 0,218$ , somit  $\delta = 12,3^\circ$ . Mit  $c_a = 0,4$  und  $c_w = 0,04$  wird  $\theta = 5,71^\circ$  und  $Q = 0,595 \text{ kp}$ ,  $W = 0,0595 \text{ kp}$ ,  $A = 0,513 \text{ kp}$ . Der mit dem Auftrieb gekoppelte Rücktrieb beträgt  $0,18 \text{ kp}$ . Um ihn und den Rumpfwiderstand zu überwinden, müßte der Abschlag einen Schub von  $0,62 \text{ kp}$  erzeugen. Der mit dem vorliegenden Flügel bei den gegebenen Geschwindigkeiten erreichbare Schub beträgt jedoch nur  $0,49 \text{ kp}$  bei  $c_a = 1,08$  und  $c_w = 0,123$ . Der gleichzeitig erzeugte Auftrieb wäre aber mit reichlich  $1,5 \text{ kp}$  bereits dreimal so groß, wie er sein dürfte. Es spricht also einiges dagegen, daß sich der Kraftflug in dieser Weise abspielt.

Die mittlere Flugleistung der Krähe ergab sich zu  $\bar{N} = 0,0295 \text{ PS}$  (s. S. 17). Hier sei eingefügt, daß die Flugleistung keineswegs als Produkt aus Schub und Geschwindigkeit gewonnen werden kann, wie es BROWN (1961) angibt, weil da bei der Schubwirkungsgrad des Flügelschlages nicht berücksichtigt wird und eine zu geringe Leistung resultiert. Wir erhalten nun eine Leistungsbelastung  $\frac{G}{\bar{N}} =$

$18,5 \text{ kp PS}$ . Dieser Wert ist, absolut gesehen, hoch, wenn man die aus dem Flugzeugbau bekannten Größen (3 bis 8 kp pro PS) dagegenhält. Jedoch muß bei dem Vergleich auch die Größe von Vogel und Flugzeug berücksichtigt werden. Wenn sich z. B. die Flügellängen von Vogel ( $l_1$ ) und Flugzeug ( $l_2$ ) wie  $\frac{l_1}{l_2} = x$  verhalten, so stehen die Gewichte im Verhältnis  $x^3$ , und die Leistungsbelastungen verhalten sich wie  $x^{-4}$ . Nehmen wir wie im Falle von Amsel und Star (OEHME 1963) ein Flugzeug mit  $l_2 = 5 \text{ m}$  an, so betrüge dessen Vergleichsge-

wicht  $\approx 980 \text{ kp}$ , seine Leistungsbelastung  $\approx 4,9 \text{ kp PS}$ . Der „Flugmotor“ der Krähe hat also „Normalstärke“. Verglichen mit kleinen Vögeln ist er aber deutlich schwächer: bei Amsel und Star führt die gleiche Rechnung auf 1,5 bis  $2 \text{ kp PS}$  für das „Vergleichsflugzeug“.

Verwenden wir die Flugleistung noch zu einer anderen Betrachtung. Bei einer Leistung von  $2,21 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$  erhält man in einer Stunde die Arbeit von  $\approx 8000 \text{ kp} \cdot \text{m}$ . Bei einem Wirkungsgrad der Flugmuskulatur von 25% ergibt das einen Energiebedarf von  $\approx 32000 \text{ kp} \cdot \text{m} = 75 \text{ kcal}$ . Bei fünfständigem Flug wären also rund 375 kcal aufzuwenden. Nach GROEBBELS (1932) kann man den Grundumsatz einer  $0,5 \text{ kp}$  schweren Krähe mit  $\approx 80 \text{ kcal pro Tag}$  ansetzen. Rechnet man die gleiche Energie noch einmal für „Nichtflugleistungen“ so ergäbe sich ein Gesamtenergiebedarf pro Tag von  $\approx 535 \text{ kcal}$ . Nimmt man eine Nahrung mit dem Kaloriengehalt der Mehlwürmer ( $1 \text{ p} \hat{=} 2,4 \text{ kcal}$ ) an, so ergibt sich ein Nahrungsbedarf von  $\approx 220 \text{ p}$  ( $\approx 45\%$  des Körpergewichtes).

Finden wir in den bisherigen Erwägungen eine Stütze für die Flugmechanischen Auswertungen des Krähenfluges, so muß nun auf einen Widerspruch eingegangen werden, der sich vorerst nicht beseitigen läßt. Die Abschlagsleistung beträgt  $6,32 \text{ kp} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} = 0,0843 \text{ PS}$ . Das Gewicht der Flügelsenker ist nach MAGNAN (1922) 14% des Gewichtes ( $\approx 0,07 \text{ kp}$ ). Das heißt aber, daß die Pectoralmuskulatur eine spezifische Leistung von  $\approx 1,2 \text{ PS/kp}$  hätte. Nach DICKINSON (zit. nach HERTEL 1963) ist die kurzzeitige Spitzenleistung des Säugetiermuskels  $0,054 \text{ PS/kp}$ . BROWN (1961) nennt als Größe der Dauerleistung, die er auch bei Vögeln als gültig annimmt,  $\approx 0,027 \text{ PS/kp}$ .

Nun hat HERTEL (1963) für den Schwirrflug am Ort bei dem Kolibri *Melanotrochilus fuscus* die spezifische Leistung der „Flugmuskulatur“ aus der Strahlleistung des Hubstrahls mit  $0,088 \text{ PS/kp}$  errechnet. Dabei wurde jedoch nicht berücksichtigt, daß die Strahlleistung im Abschlag nur vom Flügelsenker, im Aufschlag nur vom Flügelheber hervorgebracht wird. Wären beide Muskeln gleich mächtig, so ergäbe das bereits  $0,176 \text{ PS/kp}$ , und berücksichtigt man das tatsächliche Gewichtsverhältnis Flügelsenker/Flügelheber (1.7:1), so ergibt sich für den Flügelheber sogar eine spezifische Leistung von  $0,24 \text{ PS/kp}$ . Ich bin auf anderem Wege zu demselben Resultat gekommen, indem ich nach den Angaben bei GREENEWALT (1960) ( $G = 0,0068 \text{ kp}$ ,  $l = 0,08 \text{ m}$ ,  $F = 0,0045 \text{ m}^2$ ) und HERTEL ( $n = 28,5 \text{ sec}^{-1}$ ,  $\varphi = 120^\circ$ ) die Standzugleistung des „gleichwertigen Tragflügels“ nach VON DOEPP (1936) berechnete. Das VON DOEPPsche Verfahren ist die Grundlage der von mir (s. auch OEHME 1963) durchgeführten Rechnungen. Die prinzipielle Übereinstimmung wird auch nicht dadurch gestört, daß die HERTELSche Rechnung mit der tatsächlichen Flächenbelastung ( $1,5$  statt  $2,5 \text{ kp} \cdot \text{m}^{-2}$ ) etwas kleinere Werte gibt, was aber schon dadurch weitgehend aufgehoben wird, daß der Wirkungsgrad des „Kolibripropellers“ wahrscheinlich kleiner ist als der angenommene (0,85). Nun steht weiter fest, daß die vom gleichen Kolibri im Streckenflug aufzubringende Leistung wesentlich größer ist, die spezifische Leistung dann bei mindestens

0,5 PS/kp gesucht werden muß, womit man schon in die Nähe des Krähenwertes kommt. Zur Vervollständigung sei angeführt, daß die von mir an Kleinvögel berechneten Flugzustände folgende spezifische Leistung der Flügel senker ergeben: Star im „Bremsflug“ 0,5 PS/kp, Star und Amsel im Streckenflug um 1,4 PS/kp.

Die hier angeführten Werte erscheinen im Vergleich mit der Muskulatur der Säugetiere als unmöglich, und man ist geneigt, den Grund dafür in falschen physikalischen Voraussetzungen zu sehen. Aber auch, wenn man dem Vogel einen verschwindend kleinen Rumpfwiderstand gäbe und dem Flügel eine extrem niedrige Gleitzahl  $\left(\frac{c_w}{c_a}\right)$  auch bei geringen  $c_a$ -Werten zudiktierete, würde das „Paradoxon“ nicht verschwinden. Wäre es der Krähe z. B. möglich, das Kräftegleichgewicht aufrechtzuerhalten, wenn im Abschlagnur ein Auftrieb von 0,7 kp erzeugt würde (der Aufschlag dann im Mittel 0,38 kp Auftrieb hervorbrächte), und ein Schub von 0,28 kp genügte, so wäre immer noch eine Abschlagsleistung von 0,055 PS erforderlich, was einer spezifischen Leistung von  $\approx 0,79$  PS/kp entspräche.

Es spricht einiges dafür, daß die in der Rechnung benutzten Widerstandswerte zu hoch sind. Die gleitende Krähe hat nach eigenen Beobachtungen eine Gleitzahl  $\varepsilon = \frac{c_{w_{ges}}}{c_a} \approx 1:10$  bei  $v \approx 9 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ . Mit der gegebenen Flügelfläche ergäbe sich bei Benutzung des Profils 417 a für  $c_a = 0,75$  eine Restwiderstandszahl  $c_{wR} = 0,016$ . Wenn man  $c_{wR}$  höher ansetzt, z. B. 0,07, müßte der Flügelwiderstand unwahrscheinlich klein sein:  $c_w \approx 0,005$ . Wahrscheinlich ist der Rumpfwiderstand kleiner als angenommen (0,07), und auch der Flügel hat, verglichen mit dem Profil 417 a, wahrscheinlich eine bessere, d. h. kleinere Gleitzahl  $\left(\frac{c_w}{c_a}\right)$ . Da keine Messungen an dem wirklichen Flügel existieren, mußte auf die Behelfslösung der Rechnung mit der Polare 417 a zurückgegriffen werden. Übrigens bleibt man auch mit Auftriebs- und Widerstandswerten, die man aus der genannten Gleitzahl grob schätzen kann, noch über dem oben angeführten spezifischen Leistungsvermögen von 0,79 PS/kp.

So bleibt nur übrig, die extrem hohe spezifische Leistung der Flugmuskulatur, wie sie aus den Flugberechnungen hervorgeht, zur Erörterung zu stellen und zu hoffen, daß sich die Muskelphysiologen diesem Problem zuwenden.

#### Zusammenfassung

Die Flugbewegung der Nebelkrähe (*Corvus corone cornix*) im unbeschleunigten Horizontalflug wird durch Auswertung von Zeitlupenfilmen dargestellt. Auf die Übereinstimmung mit anderen größeren Vögeln wird hingewiesen.

Mit den gemessenen Geschwindigkeiten des Vogels und des Flügels werden die Luftkräfte für Ab- und Aufschlag berechnet. Es werden dabei die Beiwerte des Göttinger Profils 417 a verwendet, welches den Flügelprofilen sehr ähnlich ist.

Im Gegensatz zu anderen Darstellungen ergeben sich folgende Befunde:  
Im Abschlagnur wirkt der Flügel als funktionelle Einheit (Propellerflügel).

Im Aufschlag übernimmt der Handflügel die Verbesserung der Strömungsverhältnisse am allein tragenden Armflügel (Endscheibenwirkung).

Nur im Aufschlag eilt der Armflügel dem Handflügel voraus, was zu einer Erholungspause für den Flügel senker führt.

Eine gleichmäßige Auftriebserzeugung in Ab- und Aufschlag ist nicht möglich. Der Abschlagnur produziert nicht nur den Schub für den gesamten Flügelschlag, sondern auch erheblichen Auftriebsüberschuß. Die resultierende Höhengschwankung ist unbedeutend.

Die errechnete Flugleistung wird diskutiert. Im Hinblick auf die Nahrungsbilanz des Vogels erscheint sie annehmbar. Sie ergibt jedoch eine im Vergleich mit dem Säugetiermuskel riesenhafte spezifische Leistung des Flügelsenkens. Daher sind physiologische Untersuchungen an der Flugmuskulatur besonders nötig.

#### Summary

The wing movements of the hooded crow (*Corvus corone cornix*) in not accelerated horizontal flight are analyzed by means of slow motion photography. The coincidence with other larger birds is pointed out.

The forces produced in downstroke and upstroke are calculated on the basis of the velocities of the bird and of the wing. Thereby the coefficients (for lift and drag) of the wing-profile "Göttingen 417 a" are used.

Opposite to other explanations the following statements are made:

During the downstroke the wing as a whole works in the same way as a propeller blade.

During the upstroke the primaries (hand) improve the conditions of the air-stream which produces lift at the inner part of the wing (forearm).

Only during the upstroke the wrist hurries on in advance to the wing tip. A rest for the pectoral muscle results.

The downstroke produces not only propulsion but also a surplus of lift. The lift of the upstroke is less than the weight. The staggering of height resulting from this fact is very little.

The power per weight unit of the pectoral muscle resulting from the calculated forces is gigantic when compared with known data of mammalian muscle. For this reason physiological investigations of flight muscles seem to be necessary.

#### Schrifttum

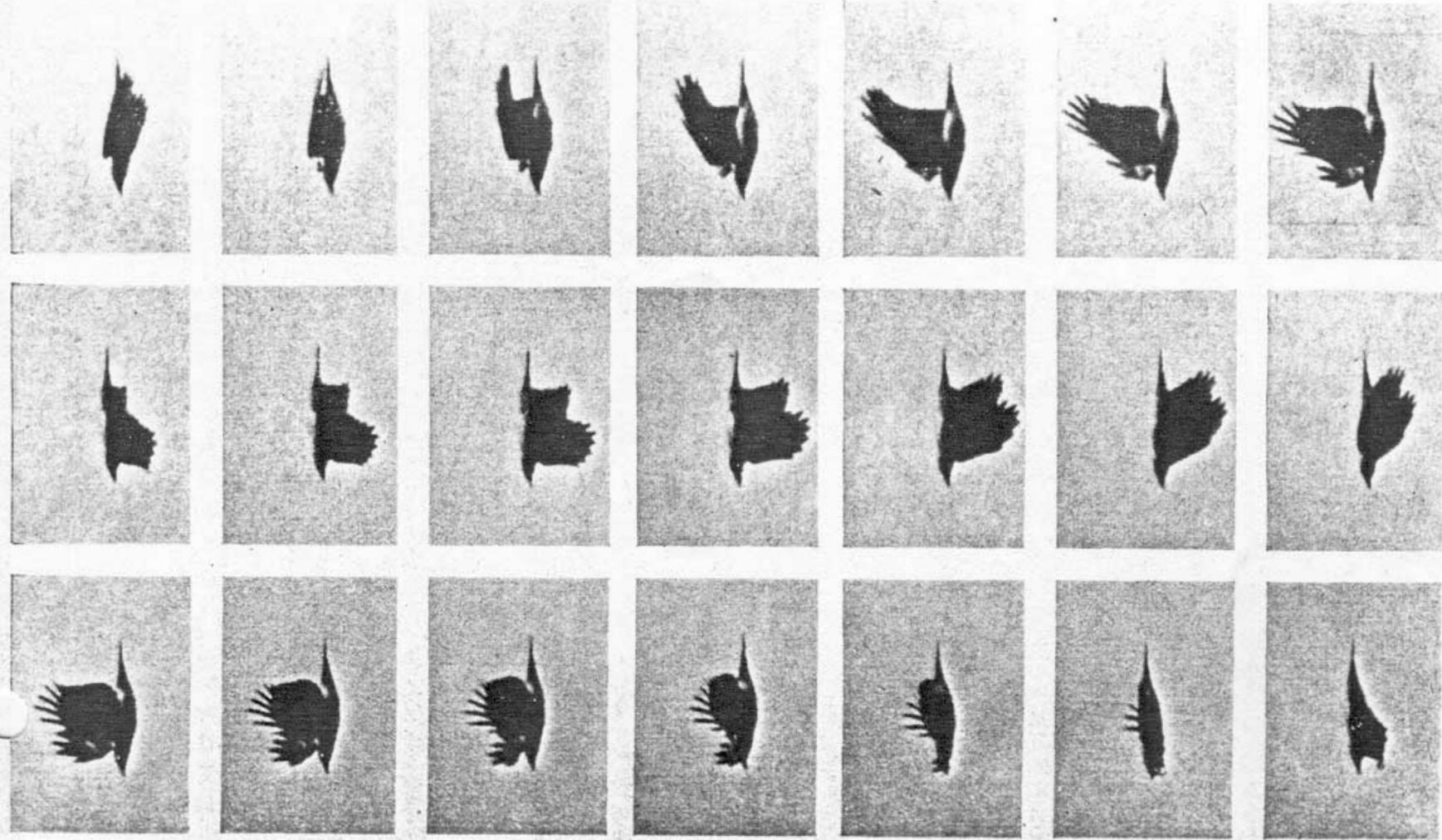
- BROWN, R. J. H. (1951): Flapping Flight. Ibis 93, 333—359.  
— (1961): Flight. In: Biology and Comparative Physiology of Birds. Vol. II. Herg. A. J. MARSHALL. New York u. London.  
DEMOLL, R. (1930): Die Flugbewegungen bei großen und bei kleinen Vögeln. Z. Biol. 98, 199—230.  
DOEPP, P. H. v. (1936): Luftschraubenberechnungen nach dem Verfahren der gleichwertigen Tragflügelprofile. Luftfahrtforsch. 13, 46—56.  
FLACHSBART, O. (1932): Messungen an ebenen und gewölbten Platten. In: Erg. Aerodyn. Versuchsanst. Göttingen, 4. Liefg., Herg. L. PRANDTL u. A. BETZ. München u. Berlin.  
GREENEWALT, C. H. (1960): Dimensional Relationships for Flying Animals. Greenville, Delaware.  
GROEBBELS, F. (1932): Der Vogel. Bd. 1. Berlin.

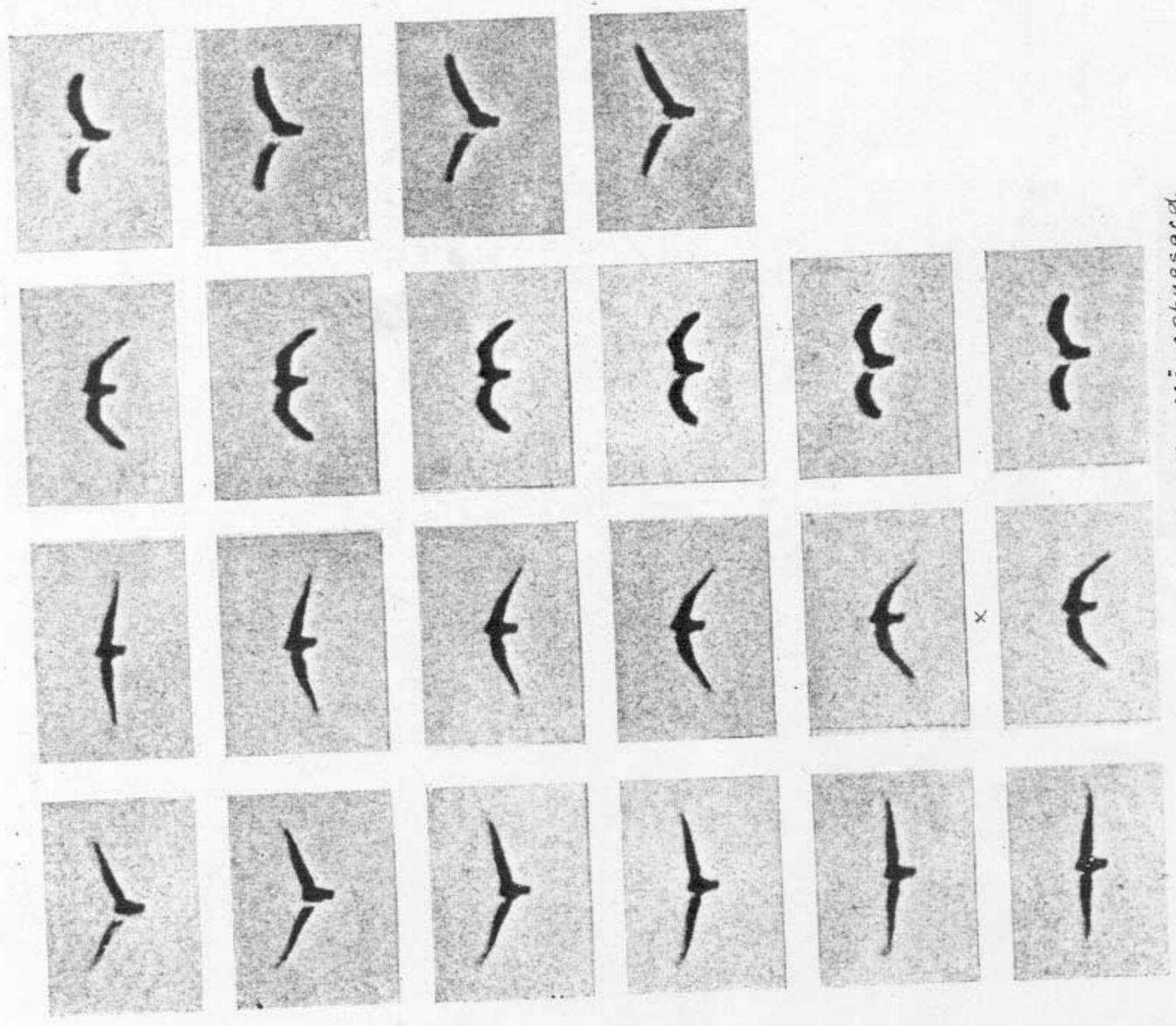
- HERTEL, H. (1963): Struktur-Form-Bewegung (Biologie und Technik). Mainz.
- HOLST, E. v. (1943): Über „künstliche“ Vögel als Mittel zum Studium des Vogelfluges. *J. Orn.* 91, 406—447.
- u. KÜCHEMANN, D. (1941): Biologische und aerodynamische Probleme des Tierfluges. *Naturw.* 29, 348—362.
- LANGER, R., u. SEIFERTH, R. (1935): Neuere Profiluntersuchungen. In: *Erg. Aerodyn. Versuchsanst. Göttingen*, 3. Liefg., Herg. L. PRANDTL u. A. BETZ. 2. Aufl. München und Berlin.
- MAGNAN, A. (1922): Les caractéristiques des oiseaux. *Ann. Sci. Nat.* 5, 125—334.
- NIETHAMMER, G. (1937): Handbuch der deutschen Vogelkunde. Bd. 1. Leipzig.
- OEHME, H. (1963): Flug und Flügel von Star und Amsel. *Biol. Zbl.* 82, 412—454, 569—587.
- OEHMICHEN, E. (1950): Le vol des oiseaux. In: *Traité de Zoologie*, T. 15. Paris.
- PRANDTL, L. (1935): Der induzierte Widerstand von Flügeln mit Endscheiben. In: *Erg. Aerodyn. Versuchsanst. Göttingen*, 3. Liefg., Herg. L. PRANDTL u. A. BETZ. 2. Aufl. München und Berlin.
- SCHMITZ, F. W. (1952): Aerodynamik des Flugmodells. 2. Aufl. Duisburg.
- STOLPE, M., u. ZIMMER, K. (1939): Der Vogelflug. Seine anatomisch-physiologischen und physikalisch-aerodynamischen Grundlagen. Leipzig.
- STORER, J. H. (1948): The Flight of Birds Analyzed through Slow Motion Photography. *Cranbrook Inst. Sci. Bull.* 28, Michigan.
- WIESELSBERGER, C. (1923): Untersuchungen über Tragflügel mit unterteiltem Profil. In: *Erg. Aerodyn. Versuchsanst. Göttingen*, 2. Liefg., Herg. L. PRANDTL. München und Berlin.
- (1935): Flügelprofiluntersuchungen. In: *Erg. Aerodyn. Versuchsanst. Göttingen*, 1. Liefg., Herg. L. PRANDTL. 4. Aufl. München und Berlin.

## Tafeln I bis VII

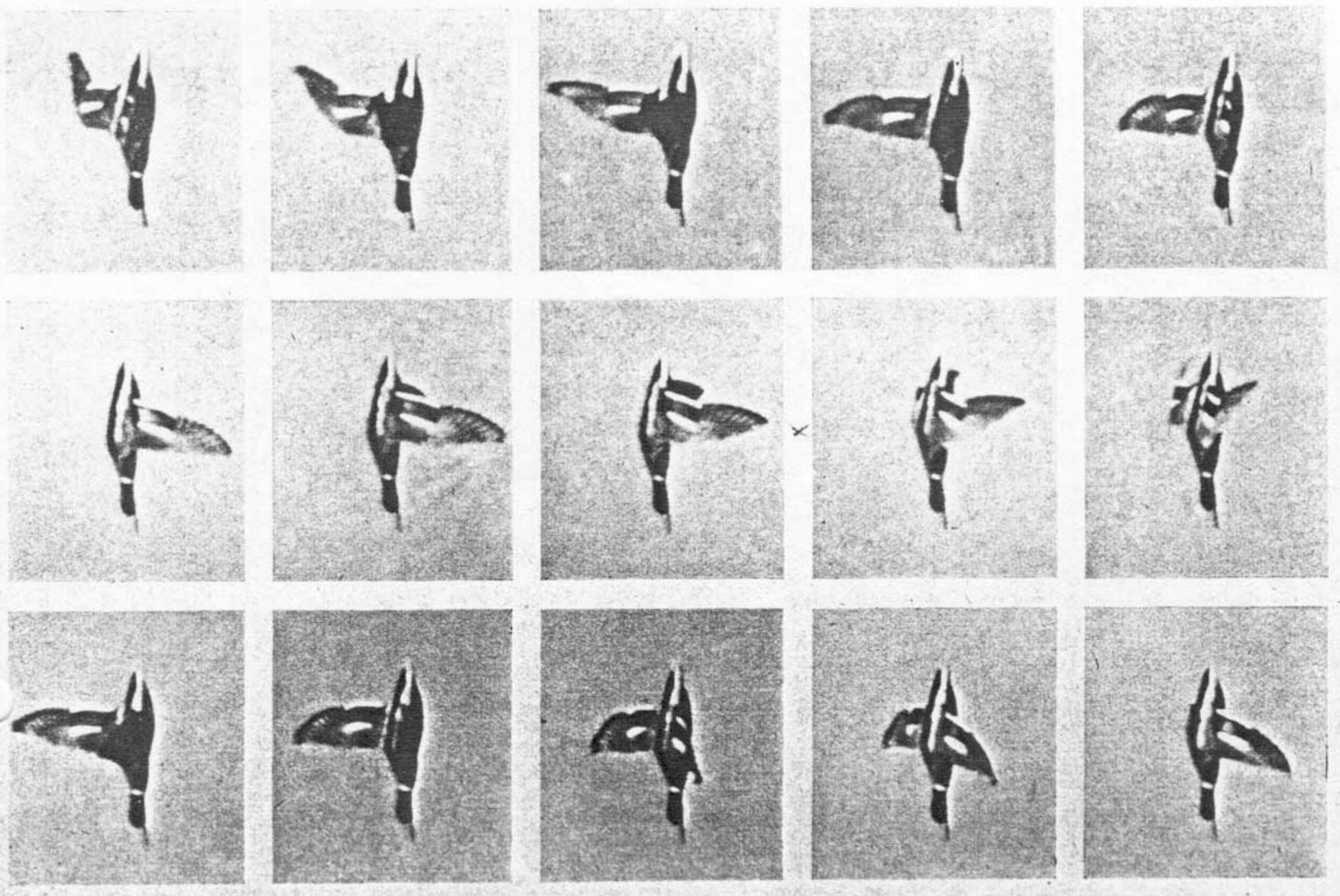
Ausschnitte aus Zeitlupenfilmen vom unbeschleunigten Horizontalfallflug großer Vögel. Es ist jeweils der Ablauf einer Flügelschwingung (Ab- und Aufschlag) abgebildet.

- I Nebelkrähe (*Corvus corone cornix*)
  - II Mäusebussard (*Buteo buteo*)
  - III Stockente (*Anas platyrhynchos*)
  - IV Kornweihe (*Circus cyaneus*)
  - V Rohrweihe (*Circus aeruginosus*)
  - VI Haustaube (*Columba livia f. domestica*)
  - VII Wanderfalk (*Falco peregrinus*)
- Bildabstand 1/80 sec (I bis III) und 1/64 sec (IV bis VII)

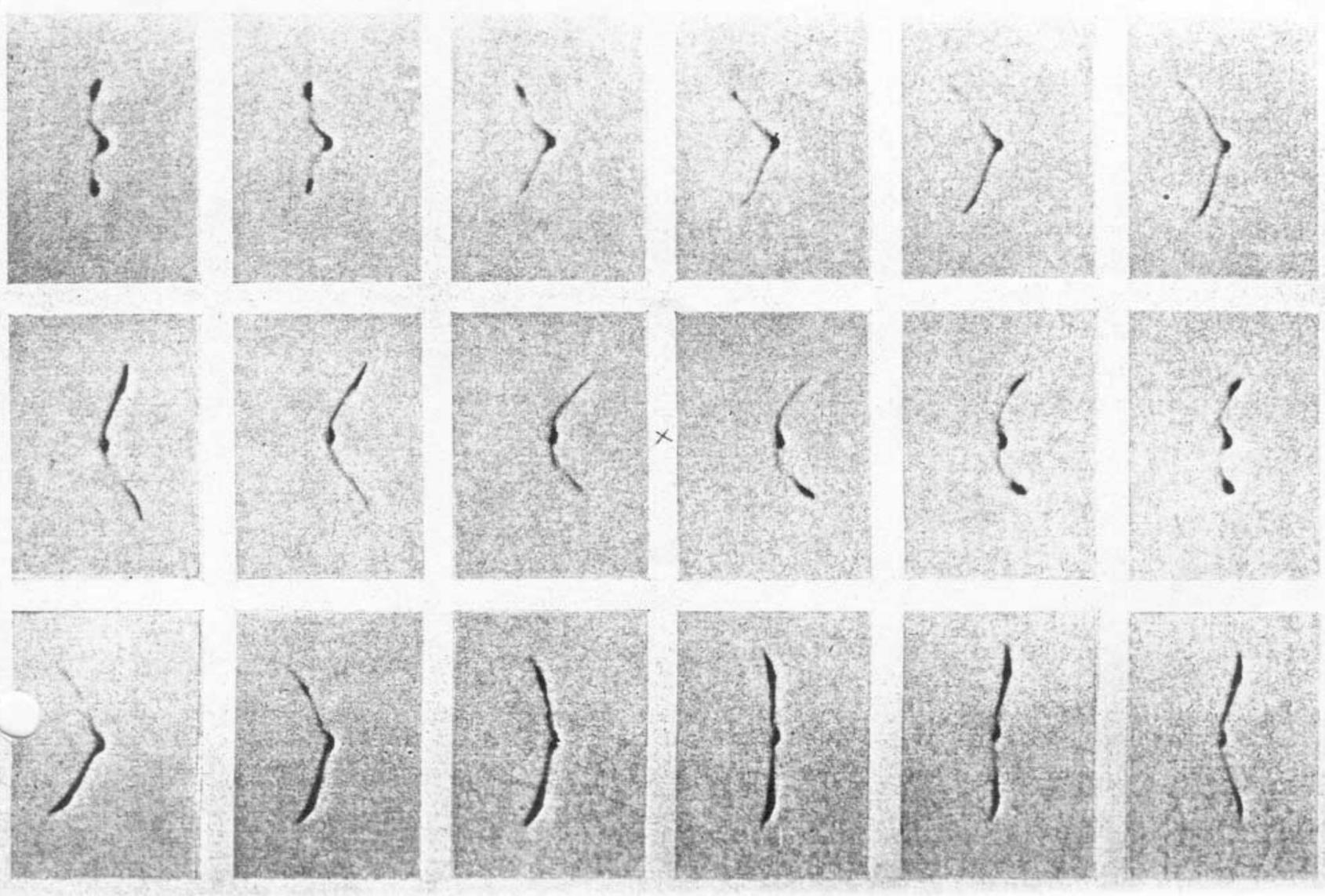
Tafel I  
Nebelkrähe



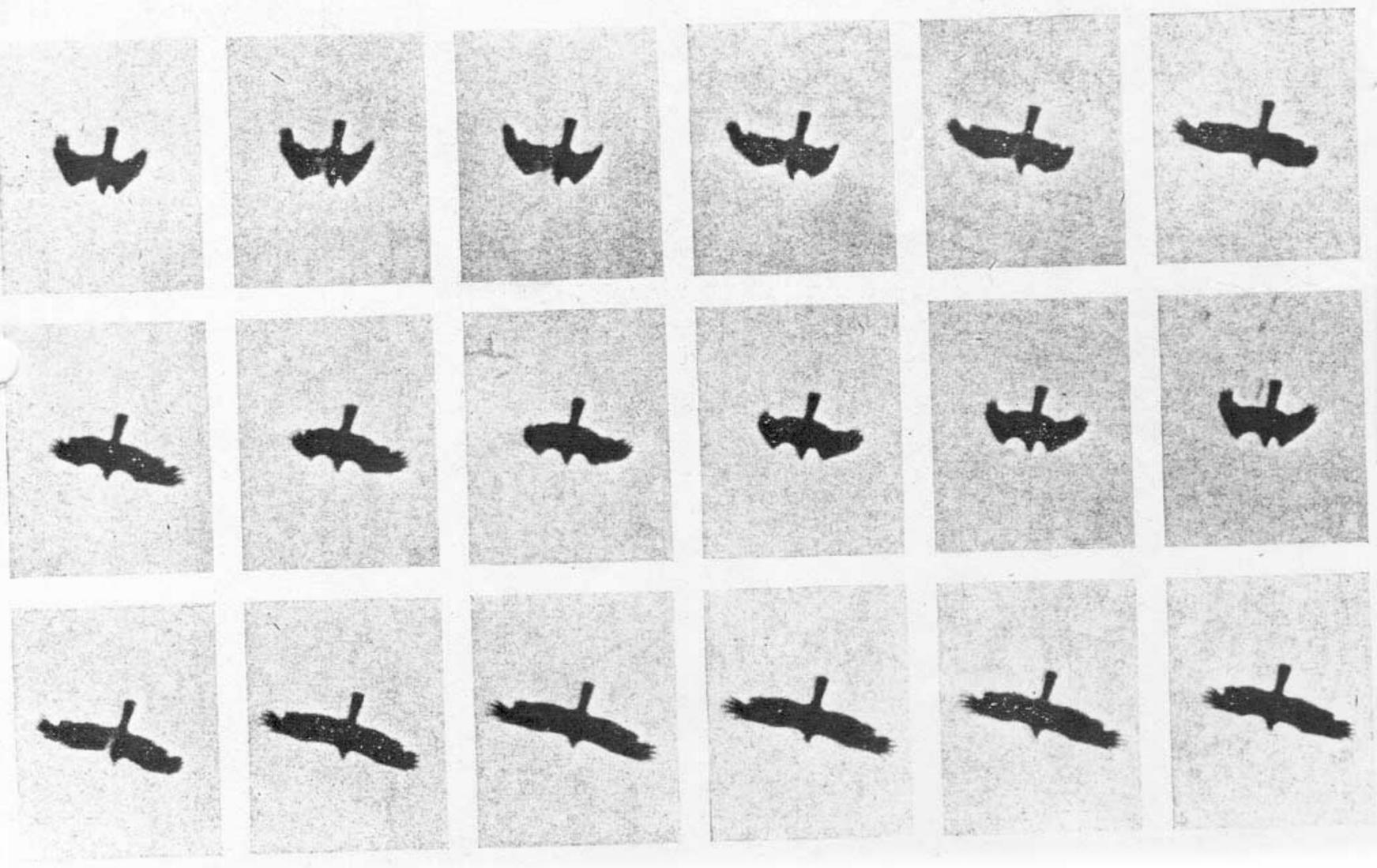
Tafel II = Mäusebussard



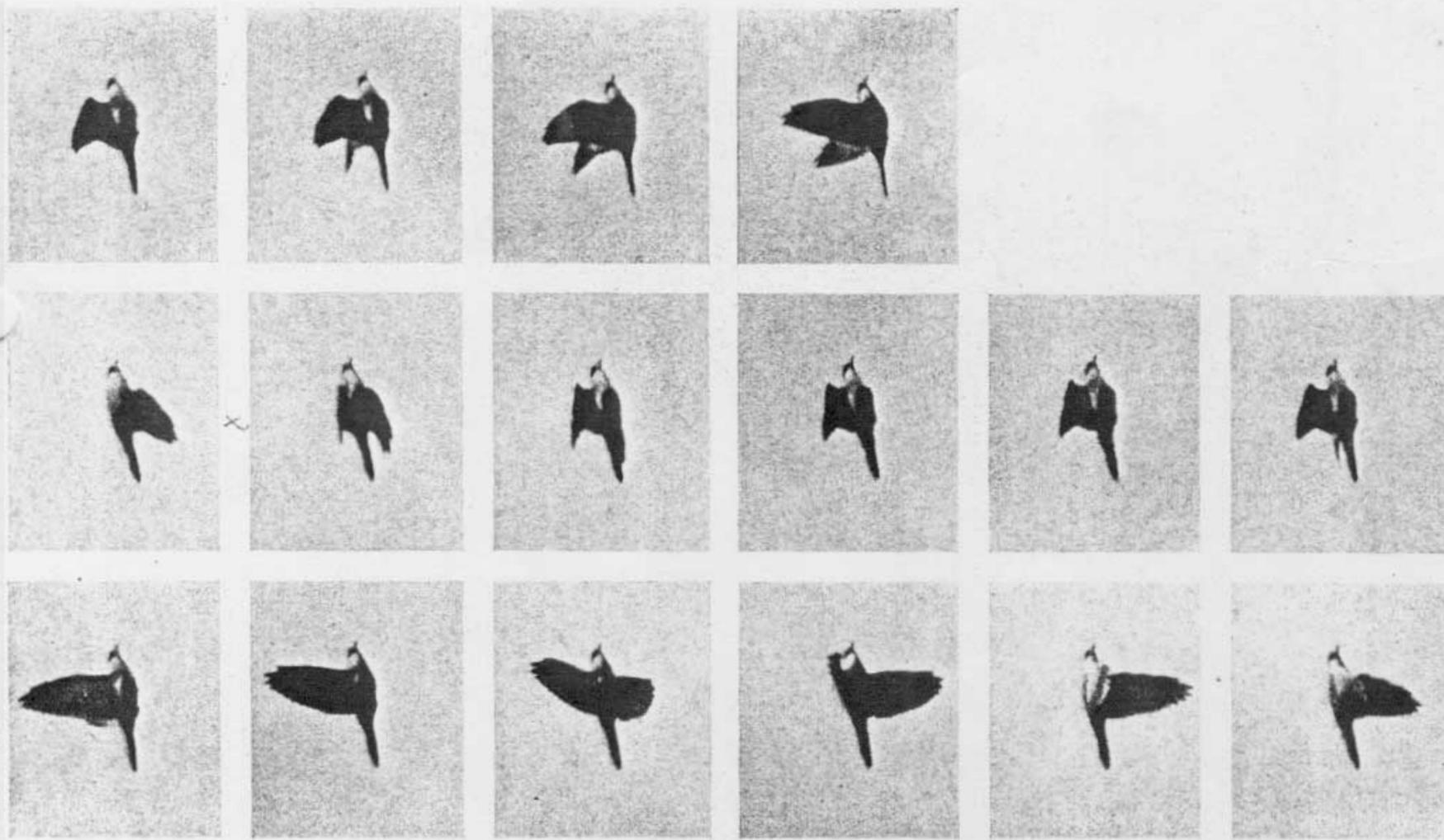
Tafel III = Stockente



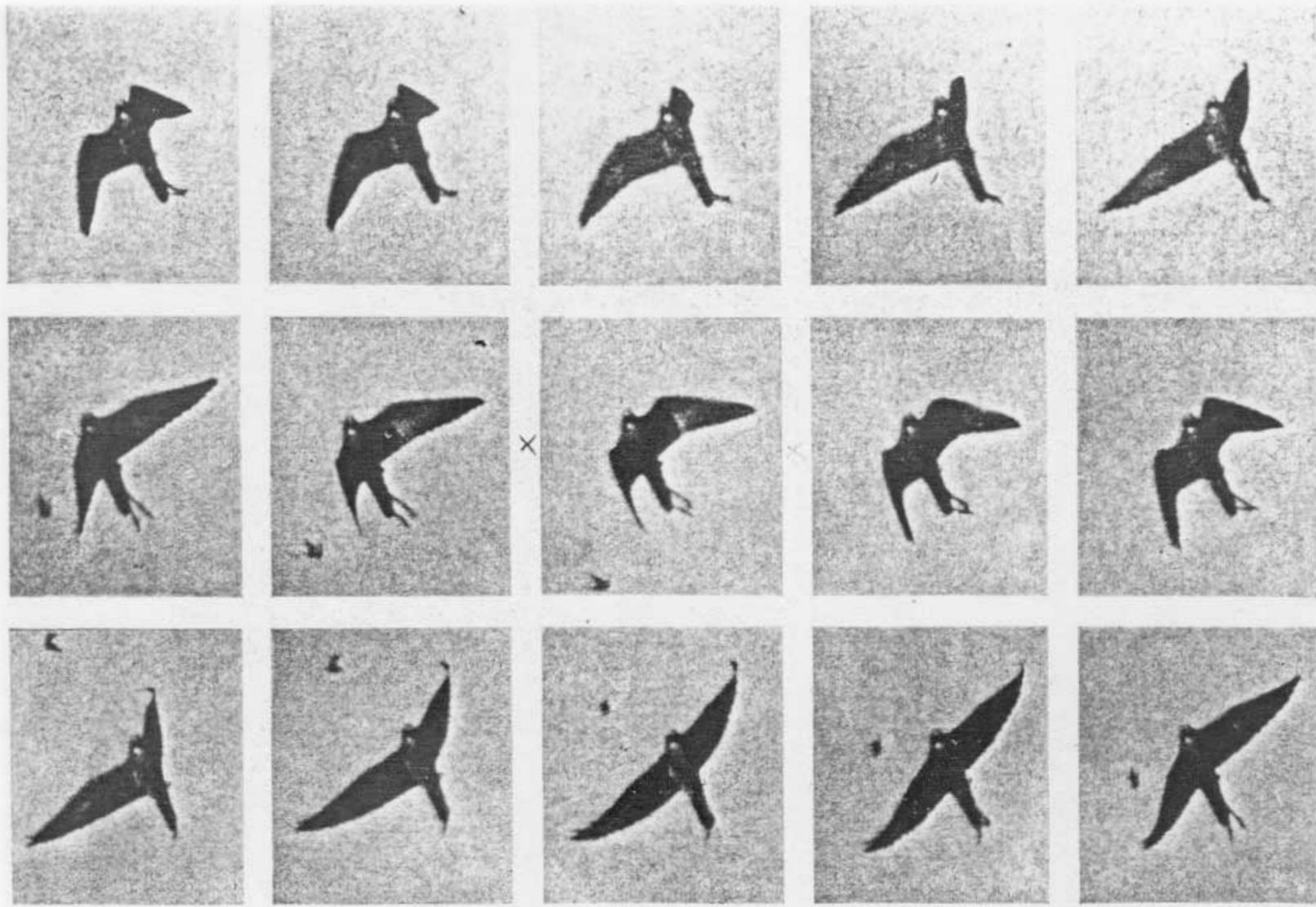
Tafel V = Rohrweiser



Tafel IV = Kornweiser



Tafel VI = Handtaube



Tafel VII = Wanderfalke