Mit besten Dank überreicht v. Veh

Ann. Naturhist. Mus. Wien	88/89	B	67–81	Wien, November 1986

Vom Flug des Habichts *Accipiter gentilis* (L.)

Von Hans Oehme[1])

(Mit 5 Abbildungen und 3 Tabellen)

Manuskript eingelangt am 11. November 1985

Zusammenfassung

Zeitlupenfilme von Angriffsflügen eines Habichtweibchens lieferten das Ausgangsmaterial für eine annähernde Bestimmung der mechanischen Flugleistung. Die Gewinnung der Basisdaten wird erläutert, Ergänzungen zum angewandten und schon früher dargestellten Rechenmodell werden beschrieben. Die festgestellten Leistungswerte bei einer Geschwindigkeit um 50 km/h werden als für Dauerleistungen zu hoch eingestuft. Die Zusammenhänge zwischen den strömungsmechanischen Eigenschaften des Vogels, insbesondere dem Rumpfwiderstand, dem Kräftespiel des Schlagzyklus und dem erforderlichen Energieumsatz werden erörtert. Auf wünschenswerte Aktivitäten zur Beschaffung von Unterlagen für vergleichende Bearbeitung verschiedener Arten sowohl hinsichtlich morphologischer Ausgangswerte als auch mit Hilfe moderner Aufzeichnungstechnik zu gewinnender Basisdaten vom Lokomotionsvorgang in freier Wildbahn wird aufmerksam gemacht.

Summary

Slow motion films of hunting flights of a female Goshawk were used for an approximate determination of the mechanical flight power. Ascertaining of the basic data ist explained and completions to the previously elsewhere represented mode of calculation are described. Power and cost of transport values at a flight speed of about 50 km/h are etimated as too high as to be used in sustained horizontal flight. Connections between the aerodynamic properties of the bird, generation of forces during the beating cycle, and the power required are discussed. With regard to desirable comparative investigations attention is called to the necessity of procuring basic morphological and kinematical data of different species to a greater extent.

Einleitung

Die Gewinnung quantitativer Aussagen zur Energetik der Lokomotion ist ein gewichtiges Anliegen zoologischer Forschung. Dabei spielt wiederum der Energieumsatz fliegender Vögel eine Rolle. Neben stoffwechselphysiologischen Untersuchungen (s. Berger & Hart 1974) liefern hierbei auch Berechnungen unter Benutzung des theoretischen Instrumentariums der Aerodynamik Beiträge (s. Oehme 1985a).

---

[1]) Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Hans Oehme, Forschungsstelle für Wirbeltierforschung (im Tierpark Berlin) der Akademie der Wissenschaften der DDR (Direktor: Prof. Dr. sc. Dr. h.c. Heinrich Dathe), Am Tierpark 125, DDR-1136 Berlin.

Die vorliegende Fallstudie zur Leistungsbestimmung an einem größeren Vogel verdankt ihr Entstehen der freundlichen Unterstützung durch Herrn Prof. Dr. GEORG RÜPPELL, Technische Universität Braunschweig, durch dessen Vermittlung mir Herr Dipl.-Biol. WILHELM MÖLLER einen von ihm hergestellten Zeitlupenfilm von Angriffsflügen eines Habichtweibchens auf fliegende, laufende und sitzende Beute zur Auswertung zur Verfügung stellte. Den Filmautor darf ich zu seiner ausgezeichneten Dokumentation beglückwünschen und ihm meinen besonderen Dank für die kollegiale Zusammenarbeit aussprechen. Zu ebenso großem Dank bin ich meinem Kollegen, Herrn Dr. sc. HOLGER DATHE, für die schnelle Überarbeitung des Rechnerprogramms und seine Anpassung an die Besonderheiten des Falles verpflichtet. Zu danken habe ich weiter meiner Assistentin, Fräulein CHRISTIANE FRANZ, für die unermüdliche und gewissenhafte Erledigung der umfangreichen foto- und meßtechnischen Arbeiten bei der Filmauswertung und der wissenschaftlichen Grafikerin, Frau INGEBORG LIEBMANN, für die Anfertigung der Illustrationen.

Zur Gewinnung der Ausgangswerte für die Kraftflugberechnung

Grundsätzlich ist das hier angewandte Rechenverfahren bereits dargestellt worden (OEHME 1985a), so daß auf eine nochmalige Herleitung verzichtet und nur auf Besonderheiten näher eingegangen wird. Um die mechanische Leistung während des unbeschleunigten horizontalen Kraftfluges zu rechnen, braucht man zwei Gruppen von Basisdaten (s. auch Abb. 1): einmal solche zur Morphologie und Geometrie des Tieres und dann solche vom Ablauf des Lokomotionsvorganges. Zur ersten Gruppe gehören die Länge des Flügels vom Schultergelenk bis zur Flügelspitze *(R)*, der Abstand der Schultergelenke *(d)*, die Veränderung der Flügeltiefe *(l)* über die Flügellänge *(r)* am voll gestreckten Flügel während des Abschlages. Dazu tritt die Fläche des Flügels im Aufschlag (A_{auf}) und die größte Querschnittsfläche des Rumpfes = „Hauptspantfläche" (A_{Sp}). Zu den morphologischen Größen kann auch die Gesamtmasse des Vogels *(m)* gestellt werden. Diese Ausgangswerte werden natürlich am besten durch Serienmessungen an lebenden oder frischtoten Tieren erhalten. Man muß ja bei solchen Modellrechnungen mit möglichst guten Durchschnittswerten arbeiten, da es nicht möglich ist, die individuellen Werte eines in freier Wildbahn gefilmten Vogels zu bestimmten. Im vorliegenden Falle gab es keine solchen Serienuntersuchungen, und die üblichen morphologischen Maße sind nicht verwendbar. Aufgrund der ausgezeichneten Qualität der Filmaufnahmen wurde daher versucht, aus den verschiedensten dokumentierten Ansichten des Vogels diese Werte zu rekonstruieren und einen „Standardvogel" zu entwerfen. Bezugsgröße war dabei die Gesamtlänge des Vogels, für die ein Richtwert beim Habichtweibchen von 60 cm angenommen werden kann (vgl. BERNDT & MEISE 1962, BRÜLL 1968, BRUNS 1975, HEINZEL et al. 1977, MAKATSCH 1969 und 1983, PETERSON et al. 1976, PFORR & LIMBRUNNER 1980, WEICK 1980). Die kinematischen Werte sind: Fluggeschwindigkeit *(v)*, der vom Flügel überstrichene Schlagwinkel ($\varphi_o - \varphi_u$), die Dauer des Schlagzyklus (t_z) und des Abschlages (t_{ab}). Das Zeitmuster der Flugbewegung ließ sich sehr genau aus den Filmaufnahmen bestimmen (Zeitmarken von 0,01 s Abstand). Der Schlagwinkel ging aus Hinter- und Vorderansichten hervor. Die Fluggeschwindigkeit ließ sich nicht direkt messen. Da der Autor des Filmes aber angab, daß kein oder höchstens schwacher Wind herrschte, wurde es als vertretbar angesehen, an ihre Stelle die „Geschwindigkeit über Grund" zu setzen, und diese ließ sich aus Aufnahmen von senkrecht zur Kameraachse verlaufenden Vorbeiflügen gewinnen. Mit auf dem Bildausschnitt vorhandenen Geländemarken unmittelbar hinter oder unter dem Vogel ließ sich die Zeit messen, die zum Zurücklegen einer Körperlänge benötigt wurde (vgl. OEHME 1980).

Erörterung der Ausgangswerte

Die erforderlichen Basisdaten sind in Abb. 1 und Tab. 1 enthalten. Dazu sind noch einige Ergänzungen nützlich.

Der Umriß des Flügels während des Abschlages (Abb. 1a) unterscheidet sich von den gewöhnlich in Bestimmungsbüchern dargestellten Flugsilhouetten. Die Zeitlupenkinematografie zeigt, daß die Flugbewegung teilweise anders verläuft, als

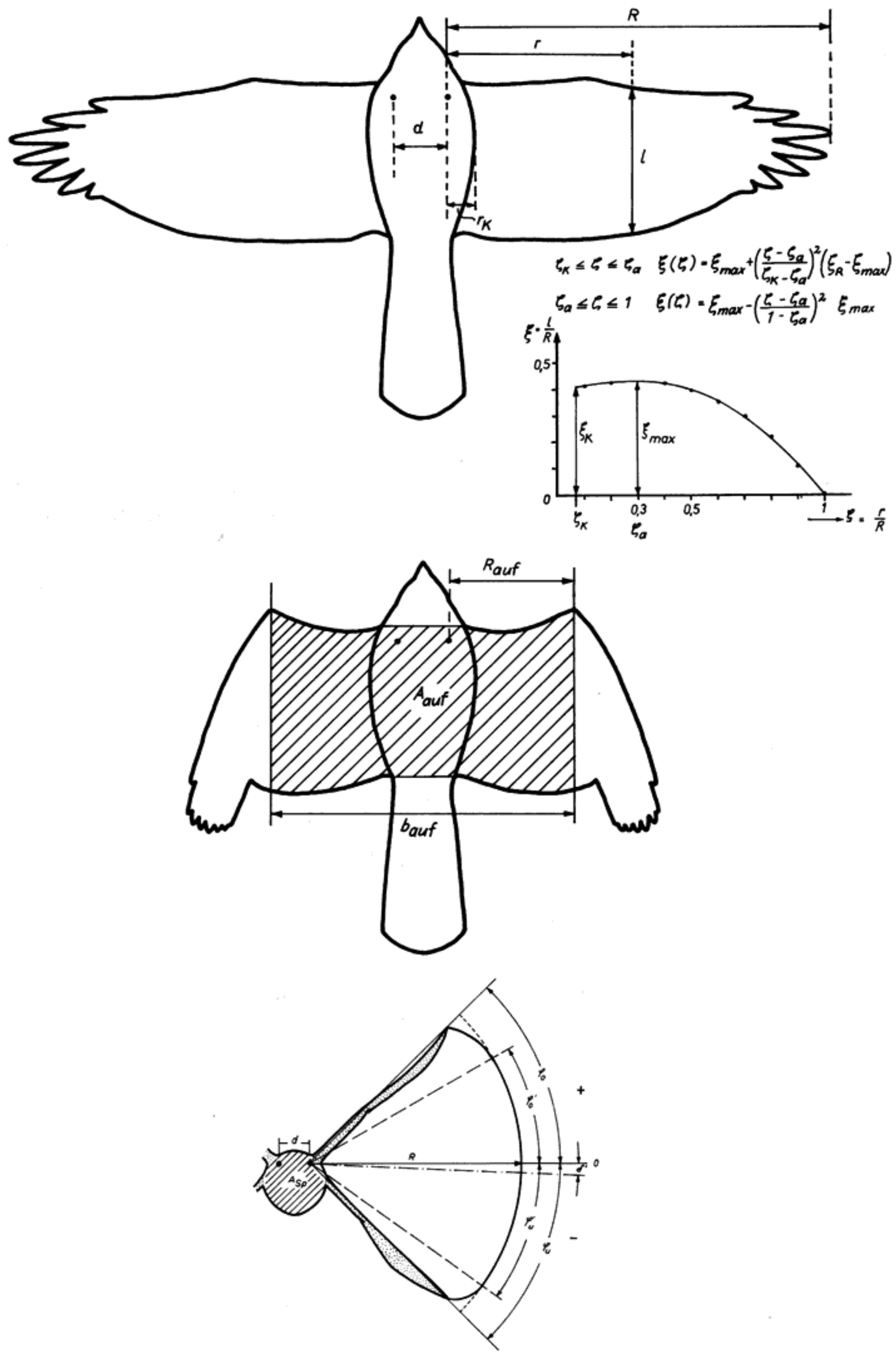

Abb. 1. Ausgangswerte für die Kraftflugberechnung
a) Flügelgeometrie des Abschlages – b) Flügelgeometrie des Aufschlages – c) Hauptspantfläche und Schlagwinkel
Erklärung der Abkürzungen in Tab. 1 und im Text

es der Eindruck ist, den uns unser Auge wegen seines begrenzten zeitlichen Auflösungsvermögens vermittelt.

Bei der Berechnung der Kräfte am Flügel im Abschlag ist die Veränderung der Flügeltiefe über die Flügellänge von der Rumpfkontur bis zur Flügelspitze erforderlich. Bei der Wiedergabe in Relativwerten ξ (ζ) ergab sich die in Abb. 1a angeführten Tiefenverteilungsfunktion als sehr genaue Näherung. Sie ist wiederum ein Sonderfall einer allgemeinen Lösung:

$\zeta_K \leq \zeta \leq \zeta_a \quad \xi(\zeta) = \xi_{max} + (\xi_K - \xi_{max})\,[(\zeta - \zeta_a)/(\zeta_K - \zeta_a)]^2$

$\zeta_a \leq \zeta \leq \zeta_b \quad \xi(\zeta) = \xi_{max}$

$\zeta_b \leq \zeta \leq 1 \quad \xi(\zeta) = \xi_{max} - (\xi_{max} - \xi_R)\,[(\zeta - \zeta_b)/(1 - \zeta_b)]^2$

Im vorliegenden Fall sind $\zeta_a = \zeta_b$ und $\xi_R = 0$. Die früher (OEHME & KITZLER 1975a) angegebene allgemeine Form der Tiefenverteilung ist als Sonderfall in der allgemeinen Lösung enthalten, wenn $\zeta_a = \zeta_b = 0{,}5$, $\xi_K = \xi_{max}$ und $\xi_R = 0$ sind, sie ist aber oft eine zu grobe Näherung, und es sollten daher künftig aus Vermessungen realer Flügel gewonnene Werte zugrunde gelegt werden.

Die Geschwindigkeiten ließen sich an 4 Szenen des horizontalen Kraftfluges bestimmen. In 2 Fällen handelte es sich um die Verfolgung einer fliegenden Nebelkrähe, dann um den Anflug auf eine laufende und auffliegende Fasanenhenne und schließlich um den Anflug auf ein sitzendes Wildkaninchen, in den beiden letzten Fällen vor dem Kontakt mit der Beute. Das Zeitmuster der Flügelbewegung wurde in diesen 4 Fällen und an einer weiteren Szene bestimmt. Da die Zeitmuster in den beiden ersten Szenen keine signifikanten Differenzen (U-Test, 5%-Niveau) ergaben (allerdings zeigte auch die vierte Szene keine gesicherte Abweichung), wurden die aus beiden gemeinsam gewonnenen Mittelwerte der Rechnung zugrunde gelegt (s. Tab. 1 u. 2). Der Geschwindigkeitsspielraum zwischen rund 46 und 66 km/h deckt sich gut mit den Beobachtungen POUNDS' (1936) am Sperber, die nach GLUTZ (1971) auch für den Habicht zutreffen. Es ist wahrscheinlich besser, auf verbreitete Formulierungen wie „blitzartiger", „rasanter" oder „stark beschleunigter" Angriffsflug zu verzichten. Verwiesen werden soll außerdem für die hier analysierten Flüge ein- und desselben Vogels auf die fast völlige Übereinstimmung in der Zyklusdauer (t_z), was auch gleiche Schlagfrequenz bedeutet, gleichzeitig aber auch auf die Unterschiede im Zeitanteil des Abschlages (τ).

Die Orientierung der Schlagbahn zur Flugrichtung wurde an drei Flügelabschlägen in genauer Seitenansicht bestimmt. Die wenig differierenden Bahnkurven wurden durch Herauszeichnen der jeweiligen Lage der Flügelspitze auf starken Vergrößerungen erhalten und daraus eine durchschnittliche Flügelspitzenbahn gewonnen (Abb. 2). Die Bahnkurve steht praktisch senkrecht auf der Flugrichtung und ist bemerkenswert wenig in cranialer Richtung gewölbt (vgl. OEHME 1985b). So steht der Anwendung des Rechenverfahrens nichts entgegen. An dieser Stelle kann auch gleich auf die Konfiguration der „freien Handschwingen" eingegangen werden. Abb. 3 zeigt die Lage der als individuelle Teilflügel sichtbaren verschmälerten Fahnenabschnitte der äußeren Handschwingen in Bezug zur Anblasrichtung. Eine starke Auslenkung der einzelnen Schwungfedern gegenüber der Ebene

Tab. 1. Verwendete Formelzeichen und Ausgangswerte für die Kraftflugberechnung, s. auch Abb. 1

Bezeichnung	Zeichen	Maß-einheit	Wert
Flügellänge im Abschlag	R	m	0,57
Abstand eines Flügelschnittes vom Schultergelenk	r	m	
relative Radialkoordinate eines Flügelschnittes	$\zeta = r/R$		
relative Radialkoordinate der Rumpfkontur	ζ_K		0,07
Flügeltiefe bei r	l	m	
relative Flügeltiefe bei ζ	$\xi = l/R$		
relative Flügeltiefe bei ζ_K	ξ_K		0,407
maximale relative Flügeltiefe	ξ_{max}		0,430
Flügellänge im Aufschlag	R_{auf}	m	0,19
Spannweite des Aufschlagsflg.	b_{auf}	m	0,46
Fläche des Aufschlagflügels	A_{auf}	m^2	0,1145
Abstand der Schultergelenke	d	m	0,08
größte Querschnittsfläche des Rumpfes	A_{Sp}	m^2	0,0230
Gesamtmasse	m	kg	1,25
Flügelwinkel	φ, φ'	° oder rad	(s. Text)
Schlagwinkel	$\varphi_o - \varphi_u$	° oder rad	90° od. II/2
Abschlagsdauer	t_{ab}	s	0,0679
Zyklusdauer	t_z	s	0,1492
relative Abschlagszeit	$\tau = t_{ab}/t_z$		0,455
Fluggeschwindigkeit	v	m/s	14,0
WQinkelgeschwindigkeit des Abschlages	$\omega = (\varphi_o - \varphi_u)/t_{ab}$	rad/s	23,134
Winkelgeschwindigkeit des Aufschlages	$\omega_{auf} = (\varphi_o - \varphi_u)/(t_z - t_{ab})$	rad/s	19,321
Luftdichte	ϱ	kg/m^3	1,29
Fallbeschleunigung	g	m/s^2	9,81
Mittlerer Hub an einem Flügel im Abschlag	F_{Hab}	N	
Umfangskraft an einem Flügel im Abschlag	F_U	N	
Schub an einem Flügel im Abschlag	F_S	N	
Hub am Aufschlagsflügel	F_{Hauf}	N	
induzierter Widerstand am Aufschlagsflügel	$F_{Wi\ auf}$	N	
Rücktrieb des Aufschlages	F_{Wauf}	N	
Profilwiderstand	F_{Wp}	N	
Rumpfwiderstand	F_{WSp}	N	
Quertriebsbeiwert am Abschlagsflügel	c_A		s. Abb. 5
Quertriebsbeiwert des Aufschlagsflügels	c_{Aauf}		s. Tab. 3
Beiwert des Profilwiderstandes	c_{Wp}		0,03
Beiwert des induzierten Widerstandes am Aufschlagsflügel	$c_{Wi\ auf}$		s. Text
Beiwert des Rumpfwiderstandes	c_{WSp}		0,43 (a) 0,25 (b) 0,07 (c)
Zirkulation	Γ	m^2/s	
Momentane aerodynamische Leistung an einem Flügel im Abschlag	P_{ae}	W	
Spezifische mechanische Leistung des Vogels, auf den Schlagzyklus bezogen	$2\ P_{ae}\ \tau/m$	W/kg	
Spezifische Transportenergie (cost of transport)	CT	J/(kg m)	

Tab. 2. Geschwindigkeiten und Zeitmuster des Flügelschlages, in Klammern: Zahl der Messungen

Szene	v (m/s)	t_{ab} (ms)	t_z (ms)	τ
1	14,0±0 (5)	68,7±0,9	149,5±2,2	0,460±0,004 (9)
2	14,0±0 (3)	66,8±2,1	148,7±1,7	0,448±0,010 (6)
3	18,3±0,4 (7)	59,6±1,8	150,6±2,4	0,402±0,011 (11)
4	12,8±0,2 (7)	67,9±1,3	150,0±2,2	0,453±0,009 (6)
		72,1±1,7	149,0±1,9	0,483±0,007 (8)

des ungeteilten inneren Flügels ist nicht festzustellen. Die Anordnung als „Winglets" im Dienste einer Verminderung des induzierten Widerstandes (s. HUMMEL 1980) tritt nicht merklich auf. Die freien Handschwingen zeigen sich im normalen Betriebszustand des Kraftfluges als ein stark gestaffeltes Mehrdeckersystem mit nur geringer Höhendifferenz zwischen den Teilflügeln. Möglicherweise überwiegt doch die Wirkung als Schlitzflügel (unterteiltes Profil). Für die Berechnung wurde keine Minderung des induzierten Widerstandes angenommen und die Flügeltiefe im geteilten Handbereich als Summe der Flügeltiefen der Teilflügel bestimmt (s. Abb. 1a).

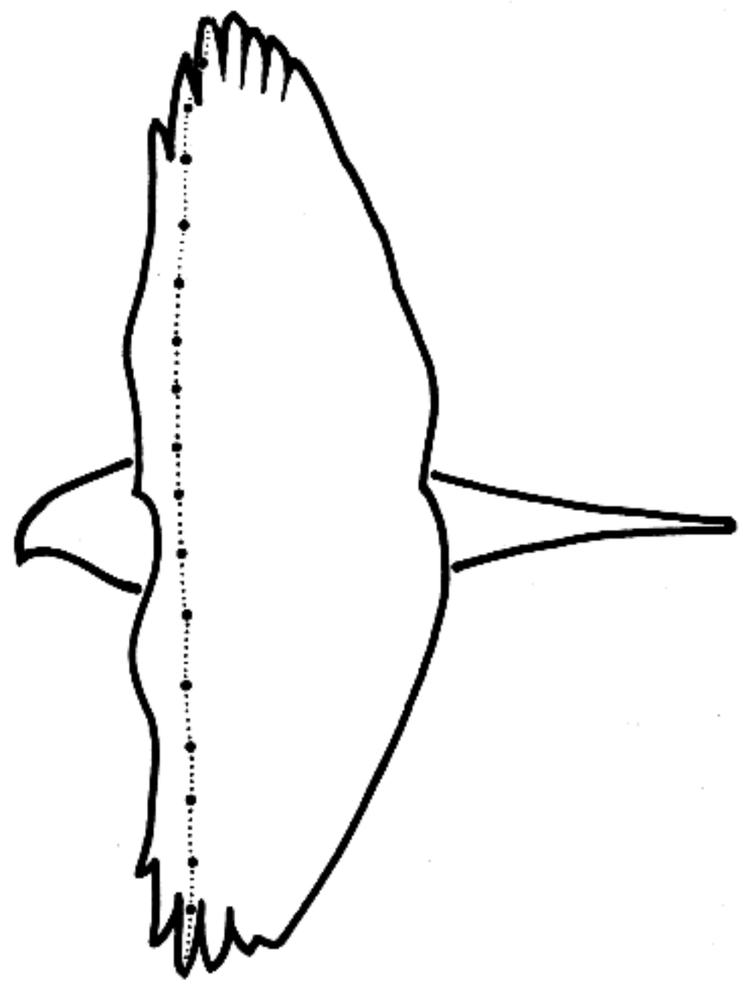

Abb. 2. Bahnkurve des Abschlages in Seitenansicht

Der im Abschlag vom Flügel überstrichene Winkel ergab sich aus direkten Vermessungen von Hinteransichten des Vogels. Der Befund wurde durch Berechnung der scheinbaren Verkürzung in Seitenansicht (vgl. Abb. 1c u. 2) überprüft. Die Übereinstimmung war befriedigend. Trotzdem ist der angenommene Schlagwinkel von 90° bzw. $\pi/2$ (s. Abb. 1c) noch recht roh, weil die mögliche Zahl der Messungen (5) zu klein ist, um die Variabilität in dieser kinematischen Basisgröße gut genug zu erfassen. Ebenso steht es um die Orientierung des überstrichenen Kreissektors zur Horizontalen. Es wird in unserem Fall von einer Symmetrie zur

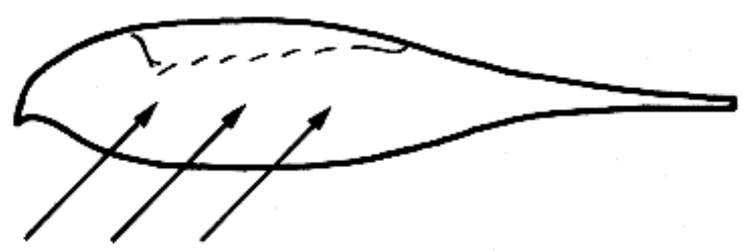

Abb. 3. Lage der freien Handschwingen im Abschlag und Anblasrichtung an der Flügelspitze, deren Orientierung durch das Verhältnis $v/(\omega R)$ bestimmt ist

Waagerechten ausgegangen. Der mögliche kleine Unsymmetriewinkel δ (s. OEHME 1985b) wird vernachlässigt. Desgleichen wurde die Längenänderung des Flügels zu Beginn und am Ende des Abschlages φ_o u. φ_u mit δ' in Abb. 1c) nicht berücksichtigt und unveränderliche Flügellänge für den gesamten Abschlag unterstellt. Die Winkelgeschwindigkeit während des Abschlages zeigte sich als annähernd gleichbleibend. Winkelbeschleunigungen wurden daher nicht eingeführt.

Die in der Rechnung verwendete Gesamtmasse (ungenau immer wieder als „Gewicht" bezeichnet) von 1,25 kg (PFORR & LIMBRUNNER 1980) kann vielleicht etwas zu hoch angesetzt sein. Bei GLUTZ (1971) sind Durchschnittswerte um 1,2 kg und Maxima über 1,35 kg angegeben. Wegen der Tendenz des Verfahrens, eher zu kleine als zu große Leistungswerte zu liefern, wurde zugunsten des jüngsten publizierten Durchschnittswertes entschieden.

Ergänzungen zum Rechenansatz

Der Vogel muß für den unbeschleunigten Horizontalflug einen Zustand herbeiführen, bei dem die Summen aller vertikalen und die aller horizontalen Impulse jeweils gleich Null sind. Der vertikalen aufwärts gerichteten Kraft (Hub) wirkt das Gesamtgewicht entgegen. Es muß also gelten, wenn $\overline{F_{\mathrm{Hab}}}$ die an einem Flügel während des Abschlages erzeugte mittlere Hubkomponente und F_{Hauf} der gesamte während des Aufschlages produzierte Hub sind,

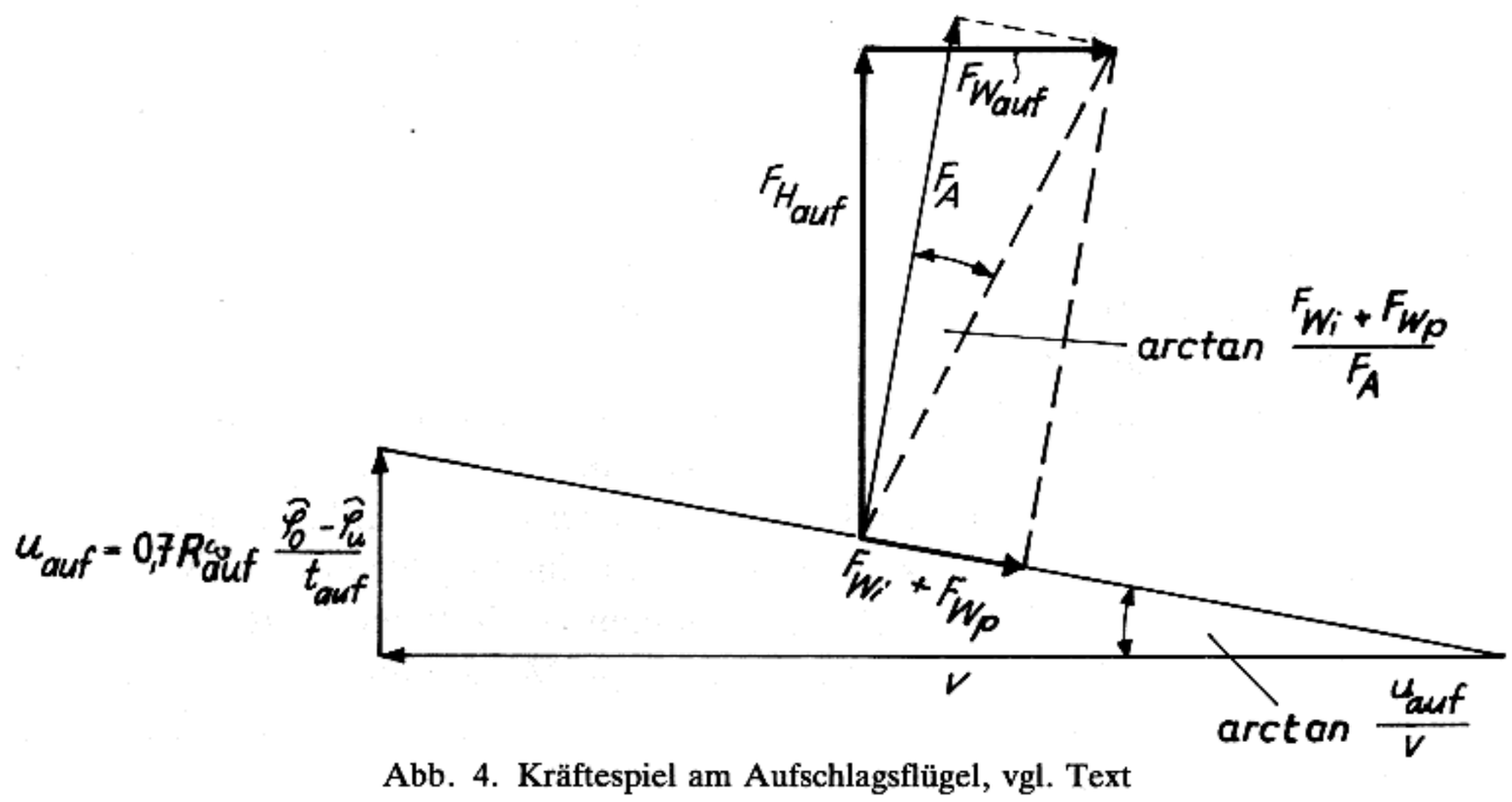

Abb. 4. Kräftespiel am Aufschlagsflügel, vgl. Text

$2\,\overline{F_{\mathrm{Hab}}}\,t_{\mathrm{ab}} + F_{\mathrm{Hauf}}\,(t_{\mathrm{z}}-t_{\mathrm{ab}}) = |m\,g\,t_{\mathrm{z}}|$, oder, wenn die relative Abschlagszeit $\tau = t_{\mathrm{ab}}/t_{\mathrm{z}}$ benutzt wird,

$2\,\tau\,\overline{F_{\mathrm{Hab}}} + (1-\tau)\,F_{\mathrm{Hauf}} = |m\,g|$.

Wenn das Verhältnis $F_{\mathrm{Hauf}}/2\overline{F_{\mathrm{Hab}}} = k$ eingeführt wird, ergibt sich

$\overline{F_{\mathrm{Hab}}}\,[\tau + k(1-\tau)] = 0{,}5\,|m\,g|$.

Die während des Abschlages erzeugte, in der Drehebene liegende und senkrecht auf R stehende Umfangskraft F_{U} wird abhängig von der Stellung des Flügels (φ) mit einer lotrechten Komponente wirksam, deren Mittel für den gesamten Schlagwinkel durch

$\overline{F_{\mathrm{Hab}}} = F_{\mathrm{U}}\,(\sin\varphi_{\mathrm{o}} - \sin\varphi_{\mathrm{u}})\,/\,(\hat{\varphi}_{\mathrm{o}}-\hat{\varphi}_{\mathrm{u}}) = F_{\mathrm{U}}\varkappa$ gegeben ist (vgl. OEHME & KITZLER (1975b) und OEHME (1981)). Also ist die erforderliche Umfangskraft $F_{\mathrm{U}} = \overline{F_{\mathrm{Hab}}}/\varkappa$, und, weil $\overline{F_{\mathrm{Hab}}} = 0{,}5\,|m\,g|/[\tau+k|\tau)]$ ist, $F_{\mathrm{U}} = 0{,}5\,|m\,g|/\{\varkappa[\tau + k(1-\tau)]\}$.

Bei den horizontalen Kräften haben wir als Gegenspieler des an jedem Flügel in Flugrichtung wirkenden Vortriebs oder Schubs (F_{S}) den Rumpfwiderstand (F_{WSp}) und den gesamten während des Aufschlages erzeugten Rücktrieb (F_{Wauf}), so daß

$2\,\tau\,F_{\mathrm{S}} = |(1-\tau)F_{\mathrm{Wauf}}| + |F_{\mathrm{WSp}}|$ ist.

Der Rumpfwiderstand ist als

$|F_{\mathrm{WSp}}| = 0{,}5\,c_{\mathrm{WSp}}\,A_{\mathrm{Sp}}\,\varrho\,v^2 = 2\,\tau\,F_{\mathrm{S}} - |F_{\mathrm{Wauf}}(1-\tau)|$ gegeben, und der Beiwert des Rumpfwiderstandes ist dann

$c_{\mathrm{WSp}} = [4\,\tau F_{\mathrm{S}} - 2|(1-\tau)\,F_{\mathrm{Wauf}}|]/\,(A_{\mathrm{Sp}}\,\varrho\,v^2)$.

Der Aufschlagsrücktrieb hängt mit dem Aufschlagshub unmitelbar zusammen. Im Verlauf der Flügelhebung ändert sich der Flügelumriß ganz erheblich. Arm- und Handflügel führen recht verschiedene Bewegungen aus (vgl. OEHME 1968). Eine „einfache" Rechnung wie beim Abschlag ist kaum möglich. Es wird deshalb hier eine Ersatzlösung vorgestellt, die wenigstens annähernd das Kräftespiel im Aufschlag abschätzen läßt. Als wirksame Fläche wird die in Abb. 1b hervorgehobene Aufschlagsflügelfläche (A_{auf}) als für den gesamten Aufschlag gültig genommen. Der mitgerechnete Rumpfanteil soll dabei ungefähr die im letzten Aufschlagsteil sich durch Entfaltung des Handflügels vergrößernde Flügelfläche abdecken. Als Spannweite gilt die Distanz zwischen den gebeugten Handgelenken (b_{auf}). Mit der Flügelstreckung $\Lambda_{\mathrm{auf}} = b^2_{\mathrm{auf}}/A_{\mathrm{auf}} = 1{,}85$ ergibt sich der Beiwert des induzierten Widerstandes für einen Rechteckflügel etwa zu $c_{\mathrm{Wi\ auf}} = 1{,}05\,c^2_{\mathrm{A\ auf}}/(\pi\,\Lambda_{\mathrm{auf}}) \approx 0{,}18\,c^2_{\mathrm{A\ auf}}$. Der Profilwiderstandsbeiwert c_{Wp} wird wie für den Abschlag mit 0,03 eingesetzt. Der Aufschlagsflügel soll sich als Tragfläche im ganzen aufwärts bewegen. Die Vertikalgeschwindigkeit gegenüber der Flugrichtung wird wie folgt geschätzt. Wenn ein Flügel sich im Schultergelenk während der Zeit $t_{\mathrm{auf}} = t_{\mathrm{z}} - t_{\mathrm{ab}}$ aus der tiefsten Lage wieder bis zum Beginn des nächsten Abschlages hinaufdreht, so ist, da der überstrichene Winkel der gleiche wie im Abschlag ist, die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\mathrm{auf}} = (\hat{\varphi}_{\mathrm{o}}-\hat{\varphi}_{\mathrm{u}})/t_{\mathrm{auf}}$. Am „wirksamen Radius" bei 0,7 R_{auf} liegt dann die Vertikalgeschwindigkeit $u_{\mathrm{auf}} = 0{,}7\,R_{\mathrm{auf}}\,\omega_{\mathrm{auf}}$ vor. Mit der Fluggeschwindigkeit v ergibt sich der Steigungswinkel der Bahn der im ganzen gehobenen Tragfläche gegenüber der Flugrichtung und die resultierende Anblasgeschwindigkeit als

$\sqrt{(u^2_{auf} + v^2)}$. Entsprechend Abb. 4 erhält man für einen Quertriebsbeiwert $c_{A\ auf}$ zusammen mit den beiden Widerstandsbeiwerten eine Gesamtluftkraft, die sich in den Aufschlagshub F_{Hauf} und den Aufschlagsrücktrieb F_{Wauf} zerlegen läßt.

Ausgangspunkt für die durchgerechneten Möglichkeiten war der Rumpfwiderstandsbeiwert. Es ist derzeit immer noch ein großer Mangel an experimentellen Bestimmungen dieser Kenngröße für verschiedene Vogelrümpfe. Nach PENNYCUICK (1968, 1971) ist der Beiwert für Haustaube und Sperbergeier sehr hoch (≈ 0,43), aber es bestehen doch Zweifel, daß die vermessenen Vogelrümpfe die normale Flughaltung einnahmen. Für den Eselspinguin haben NACHTIGALL & BILO (1980) einen sehr niedrigen Widerstandsbeiwert (≈ 0,07) gefunden. Für den stromlinienförmigen Drehkörper liegt er mit ≈ 0,05 nur wenig darunter (PRANDTL 1923). Andererseits bewirkt schon geringfügige Unsymmmetrie der Umströmung ein merkliches Anwachsen des Widerstandes (ALBRING 1978). Der Rumpf des Habichts zeigt Stromlinienform konventioneller Art mit geringer Dickenrücklage. Die Annahme eines Widerstandsbeiwertes von 0,25 ist daher plausibel, wenn auch nicht experimentell gesichert. Von diesen drei Möglichkeiten für den Rumpfwiderstandsbeiwert (0,43–0,25–0,07) wurde ausgegangen. Für ein gewähltes c_{Aauf} ergeben sich F_{Hauf} und F_{Wauf}. Aus den oben angeführten Beziehungen resultiert der erforderliche Abschlagshub $\overline{F_{Hab}}$ und daraus die erforderliche Umfangskraft F_U, die über das Drehmoment zur Leistung führt. Mit einer schrittweise veränderten Zirkulationsverteilung am Abschlagsflügel wurde nun entsprechend dem Algorithmus der Kräfte- und Leistungsberechnung (OEHME 1985a) verfahren, bis sich der Sollwert von F_U einstellte. Gleichzeitig war dann der zugehörige Schub F_S gegeben. Dieser liefert zusammen mit F_{Wauf} den Rumpfwiderstandsbeiwert. Die Veränderung von c_{Aauf} und der Zirkulationsverteilung wurde solange fortgesetzt, bis der jeweils vorgegebene der 3 Rumpfwiderstandsbeiwerte erreicht war. Gleichzeitig lag damit der jeweilige Faktor $k = F_{Hauf}/2\,\overline{F_{Hab}}$ fest. Die Rechenprozedur wurde für 14 statt für 11 über die freie Flügellänge gleichabständig verteilte Punkte, sonst aber in gleicher Weise wie bei OEHME (1985a) durchgeführt.

Zwei Zirkulationsverteilungstypen für die Abschlagsrechnung wurden verwendet. Die erste entspricht einer Entlastung des distalen Flügelteiles (a), die zweite (b) einer stärkeren Belastung des mittleren Flügelteiles. Die Indizes 1 bis 3 in Abb. 5 und Tab. 3 entsprechen den 3 c_{WSp}-Werten. Die Zirkulation an der relativen Radialkoordinate ζ_i wird definiert durch

$$\Gamma(\zeta_i) = C\, c(\zeta_i)\, w(\zeta_i)\, l(\zeta_i).$$

$l(\zeta_i)$ ist durch die Tiefenverteilungsfunktion (s. S. 69) gegeben, die Anströmgeschwindigkeit durch $w(\zeta_i) = \sqrt{(v^2 + R^2\, \zeta_i^2 \omega^2)}$. C ist frei wählbar und entspricht einem vorläufigen halben maximalen Quertriebsbeiwert, c ist ein Faktor, der durch folgende Beziehungen festgelegt ist:

$$\zeta_K \leq \zeta \leq \zeta_1 \quad c(\zeta) = 1 + [c(\zeta_K) - 1]\,[\zeta - \zeta_1)/(\zeta_K - \zeta_1)]^2$$
$$\zeta_1 \leq \zeta \leq \zeta_2 \quad c(\zeta) = 1$$
$$\zeta_2 \leq \zeta \leq 1 \quad c(\zeta) = 1 - [(\zeta - \zeta_2)/(1 - \zeta_2)]^2$$

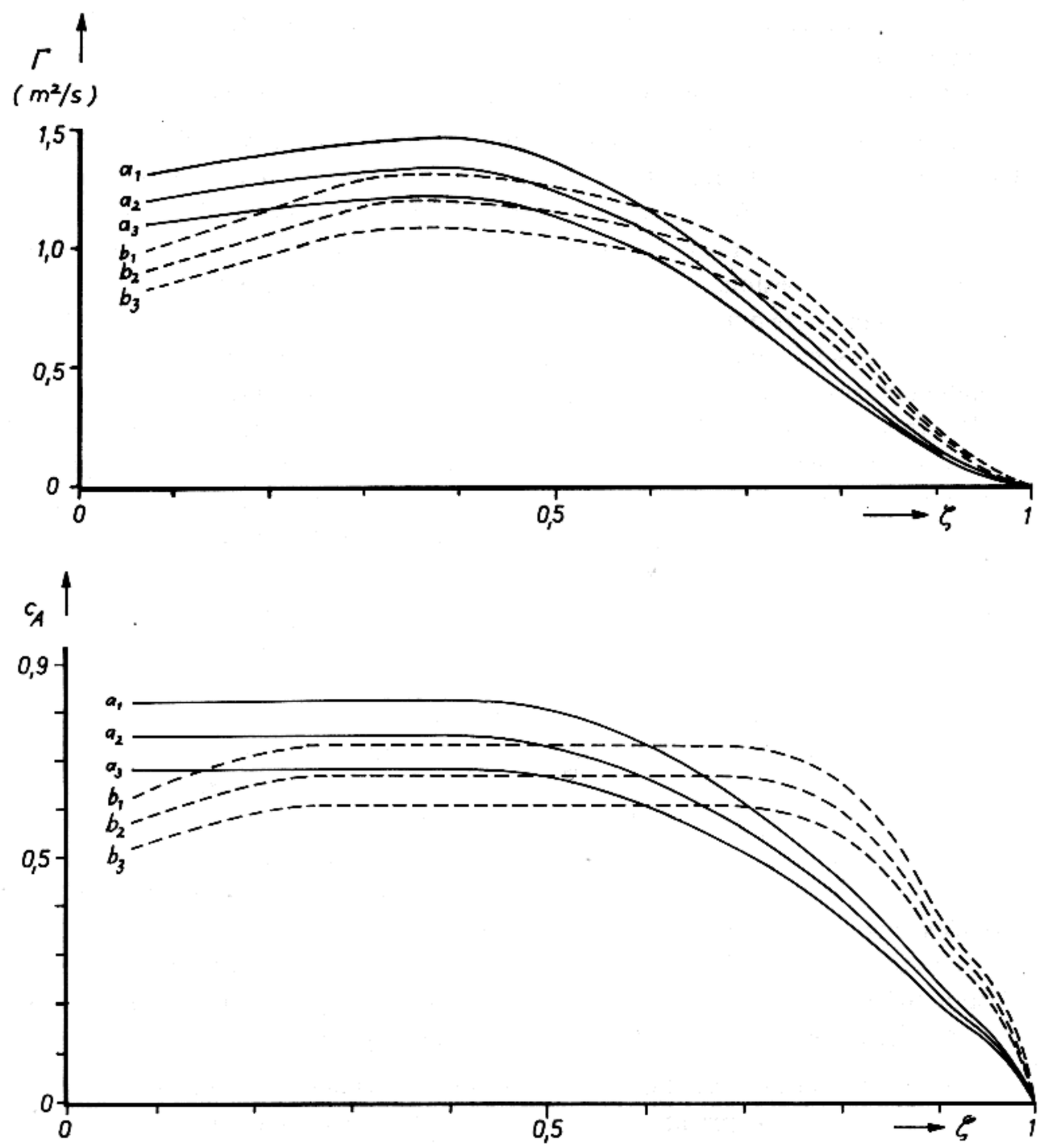

Abb. 5. Zirkulationsverteilung (a) und Verteilung des Quertriebsbeiwertes (b) im Abschlag. Erklärung der Abkürzungen im Text, vgl. auch Tab. 3

Für die Variante a gilt $c\ (\zeta_K) = 1$; $\zeta_1 = \zeta_2 = 0{,}4$; für die Variante b $c\ (\zeta_K) = 0{,}85$; $\zeta_1 = 0{,}3$; $\zeta_2 = 0{,}7$. C wird bis zur Erreichung des jeweiligen Sollwertes von F_U verändert.

Diskussion der Charakteristik des horizontalen Schnellfluges

Für den gerechneten Kraftflug ist die Dauer des Schlagzyklus $t_z = 0{,}1492$ s und die Schlagfrequenz $f = 1/t_z \approx 6{,}7$/s. Sie ist ziemlich hoch, etwa wie bei einer Stockente im Streckenflug und höher als bei der Haustaube (vgl. OEHME et al.

Tab. 3. Charakteristik des Habichtfluges

Fall	k	c_{Amax}	c_{Aauf}	$2\ P_{ae}$	$2\ P_{ae}\ \tau/m$	CT
a_1	0,395	0,823	0,505	112,42	40,92	2,92
a_2	0,515	0,750	0,601	102,50	37,41	2,66
a_3	0,650	0,680	0,691	93,26	33,95	2,42
b_1	0,455	0,725	0,555	115,43	42,02	3,00
b_2	0,575	0,663	0,643	105,65	38,46	2,75
b_3	0,712	0,604	0,727	96,32	35,06	2,50

c_{Amax} größter Quertriebsbeiwert im Abschlag, Abkürzungen und Maßeinheiten s. Tab. 1 und Text.

1977). Die nach VON HOLST & KÜCHEMANN (1941) berechnete „reduzierte Frequenz" ist $f\ R/v \approx 0{,}27$. Wenn es sich um einen auf- und abschwingenden Flügel handelt, dessen Quertrieb in den Umkehrpunkten verschwindet und dann jeweils in entgegengesetzter Richtung neu aufgebaut wird, so darf der Wert des Ausdrukkes nicht größer als 0,2 werden, wenn man die Luftkräfte so berechnen will, wie das bei einem stationär angeströmten Körper möglich ist. In unserem Falle wären also bereits Abweichungen zu erwarten. Allerdings verläuft der Flügelschlag eines größeren Vogels im Streckenflug nie so, daß der Flügel zu einem Zeitpunkt überhaupt keinen Quertrieb mehr erzeugt oder die Richtung desselben sogar umgekehrt wird. Mindestens der innere Flügelteil wird dauernd so angeströmt, daß der Quertrieb aufwärts, dabei im Abschlag zusätzlich nach vorn und im Aufschlag nach hinten, orientiert ist. Eine vollständige Zirkulationsumkehr mit jeweils gegensinnig abgehenden, gleich starken Anfahrwirbeln ist nicht vorhanden. Kleinere Anfahrwirbel werden in der zweiten Aufschlagsphase bei der Wiederentfaltung des Handlügels in den Fahrtwind hinein, über eine gewisse Zeitspanne „verschmiert" sicher auftreten, aber sie werden nie den Einfluß wie an der gesamten Flügelfläche bei abruptem Anfahren erreichen. Aus diesem Grunde wird auch für unseren Fall der quasistationäre Rechenansatz noch für zulässig gehalten. Verwiesen werden soll dabei nochmals auf den Sachverhalt, daß das Verfahren den Bewegungsablauf nicht in allen Einzelheiten erfaßt, indem die Rechnung des Abschlages ja nur für die Horizontalstellung der Flügel ausgeführt wird und die Größe von Umfangskraft und Schub für den gesamten Abschlag als gleichbleibend angesehen wird. Dasselbe gilt für die hier benutzte Behelfslösung für den Aufschlag, die nur für den Durchgang der Flügel durch die Horizontalebene das Kräftespiel einigermaßen trifft, wobei wahrscheinlich der Aufschlagsrücktrieb zu gering ausfällt.

Bevor auf die Leistungswerte der gerechneten 6 Varianten eingegangen wird, sollen noch die Verhältnisse am abschlagenden Flügel betrachtet werden. In Abb. 5a sind die Zirkulationsverteilungen dargestellt, denen jeweils eine Verteilung der örtlichen Quertriebsbeiwerte c_A entspricht (Abb. 5b). Diese werden durch Rückrechnung der Quertriebskräfte an den 14 Punkten der freien Flügellänge auf die örtliche Anströmgeschwindigkeit erhalten. Die c_A-Werte sind für

Vogelflügelprofile in dem vorliegenden Reynoldszahl-Bereich [Re ≈ w (in m/s). · l (in mm) · 70] von etwa 250.000 bei $\zeta = 0{,}3$; 225.000 bei $\zeta = 0{,}6$ und 84.000 bei $\zeta = 0{,}9$ möglich, ohne aerodynamische Wunder zu bemühen. Die Fähigkeit zur „richtigen" Einstellung des jeweiligen Flügelschnittes zur Anströmung wird dem Vogel allerdings einfach „zugetraut".

Legen wir beim Vergleich der (gerundeten) Werte der Tab. 3 das Augenmerk zunächst auf ihre Relation, so ergibt sich eine auch abstrakt herleitbare, aber hier wegen der Zahlenbeispiele leichter überschaubare Beziehung. Wenn über den gesamten Schlagzyklus möglichst geringe Differenzen der Hubkräfte vorliegen sollen (k möglichst groß), so ist der Rumpfwiderstand so niedrig wie möglich zu halten, was sich auch in entsprechend geringer Abschlagsleistung niederschlägt. Ebenfalls in der Richtung der Verkleinerung der Hubdifferenzen wirkt eine stärkere Belastung des äußeren Flügelteiles (Variante b), die eine relative Vergrößerung des Schubs bedeutet, aber mit höherer Motorleistung erkauft werden muß. Somit nimmt der Rumpfwiderstandsbeiwert eine gewisse Schlüsselstellung ein, und es sollte doch, wo die technischen Möglichkeiten bestehen, die experimentelle c_{WSp}-Bestimmung an recht verschiedenen Vogelrümpfen, vor allem unterschiedlicher Größe, betrieben werden.

Die spezifische Leistung (Leistung – Masse – Verhältnis) ist sicher etwas zu klein. Unterstellen wir, daß die reine aerodynamische Leistung des Abschlages annähernd richtig bestimmt ist, so fehlt die zusätzliche Leistung, die zur Beschleunigung des Flügels zu Abschlagsbeginn auf die Winkelgeschwindigkeit ω nötig ist. Ihre Ermittlung erfordert die Kenntnis der Massenverteilung im Flügel und damit dessen Massenträgheitsmoments. Dies ist für den vorliegenden Fall nicht bekannt. Wenn man per analogiam (s. OEHME 1985a) 10% Zuwachs für spezifische Leistung und spezifische Transportenergie unterstellt, so liegen für die wahrscheinlichsten Rumpfwiderstände (a_2 und b_2) die spezifischen Leistungen zwischen 41 und 43 W/kg. Die Differenz, die auf die unterschiedlichen Zirkulationsverteilungen zurückgeht, ist bemerkenswert gering. Aber bereits die Werte der Tab. 3 liegen wesentlich höher, als sie für einige Arten bei Dauerleistung im optimalen Geschwindigkeitsbereich bestimmt werden konnten (OEHME et al. 1971). Daraus ergeben sich weitere Überlegungen.

Bereits eine Fluggeschwindigkeit von rund 50 km/h erfordert einen zu hohen Energieumsatz, als daß er für ausdauernden Flug in Frage kommt. Bei der größten gemessenen Geschwindigkeit von etwa 66 km/h ist das sicher erst recht der Fall. Die Gesamtflugdauer der 4 Beuteflüge ist denn auch relativ gering. Die längste Szene (1) dauerte 9,8 s, die zweite währte 2,9 s, die dritte 4,3 s und die vierte 3,3 s. Der Angriffsflug des Habichts ist nicht durch Rekordgeschwindigkeiten ausgezeichnet, sondern nur durch den Überraschungseffekt, mit dem der aus der Deckung heranstreichende Jäger die Beute an effektiven Flucht- oder Abwehrmaßnahmen hindert. Aber selbst der Jagdflug mit der normalen Stadtgeschwindigkeit eines Kraftwagens beansprucht das Tier schon stark. Ein weiteres kommt hinzu. Was nützte es dem Greif, wenn er z. B. bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h (wenn er sie erreichen kann) die Fänge in eine mit 45 km/h flüchtende

Beute schlagen wollte? Er würde sie mit 55 km/h überholen und hätte für einen plazierten Zugriff bei einer Länge des Beutetieres von 30 cm gerade 2/100 s Zeit. Andererseits würde die feste Verankerung im Beutekörper die Abbremsung auf dessen Geschwindigkeit erfordern, was einer Umwandlung von rund 120 Nm kinetischer Energie entspricht. Setzt man den möglichen Ablenkungsweg der eingeschlagenen Fänge wieder mit etwa 30 cm an, so wäre eine Scherkraft von rund 360 N auszuhalten, was etwa dem dreißigfachen Körpergewicht entspricht. Bei dieser Schätzung ist die Eigenbewegung der Fänge gegenüber dem Rumpf im Augenblick des Zugreifens nicht berücksichtigt. Aus den Erörterungen Browns (1979) ergibt sich, daß Greife beim Binden der Beute ihre Fluggeschwindigkeit auf einen physikalisch plausiblen Wert einregulieren.

Um bei ausdauerndem Streckenflug zu einer Leistungsreduzierung zu kommen, muß die Geschwindigkeit vermindert werden, und/oder es müssen zwischen Antriebsphasen (Kraftflug) Gleitflugphasen eingeschaltet werden. Dem Augenschein nach ist beim Habicht beides der Fall. Die Wandergeschwindigkeit kann man nach Thienemann (1928) zwischen 11 und 14 m/s annehmen. Die eingeschobenen Gleitflugabschnitte existieren, wobei der Vogel hier keine Höhe verliert, sondern den Hub offenbar konstant hält. Das muß er allerdings zwangsläufig mit einem Geschwindigkeitsverlust erkaufen, der dann durch Beschleunigung in der nächsten Antriebsphase wieder ausgeglichen wird. Diese Flugweise wäre durchaus rechnerisch zu erfassen, wenn die Geschwindigkeit und ihre Änderungen, das eingehaltene Zeitmuster der Flügelschläge, Schlagbahnorientierung, Schlagwinkel sowie das Zeitmuster des gesamten Flugablaufes (Dauer von Antriebs- und Gleitphasen, Anzahl der Flügelschläge pro Antriebsphase) bekannt wären. Diese Angaben stehen noch nicht zur Verfügung.

Schlußfolgerungen

Aus dem hier vorgeführten Fall einer, aus den Umständen erklärbar, noch lückenhaften Darstellung der Energetik des Habichtfluges lassen sich einige Anregungen gewinnen, wo noch vieles getan werden muß, um zu einem umfassenderen Überblick über den leistungsphysiologischen Aspekt des Problemkreises „Vogelflug“ zu gelangen. Da wäre die Gewinnung von gesicherten morphologischen Standardwerten zu nennen. Sie betreffen die Geometrie des Rumpfes und die Geometrie des Flügels, vor allem im Hinblick auf den Umriß des maximal gestreckten Flügels im Abschlag, des gefalteten Flügels im Aufschlag und des Flügels beim Gleiten. Messungen an lebenden und frischtoten Tieren bedürfen sicher oft der Unterstützung durch im Freiland gewonnene Filmaufnahmen. Auch die Bestimmung der Gesamtmasse gehört hierher. Dann wären an den Lebensstätten verschiedener Arten unter Einsatz von Film- und Videotechnik möglichst viele Basisdaten zur Kinematik des Fluges zu beschaffen, um auch hier möglichst zu Standardwerten für charakteristische, von der betr. Art praktizierte Flugweisen zu gelangen. Schließlich sind weitere experimentelle und theoretische Arbeiten zur Physik des Fliegens nötig. Dahin gehört die Frage des Rumpfwiderstandes und die

Charakteristik von Vogelflügelprofilen (NACHTIGALL & KLIMBIGAT 1985, KNAPPE & WAGNER 1985). Nicht zu vergessen ist die weitere Bearbeitung der Rechenmodelle, die den wirklichen Bewegungsablauf des Fluges noch genauer wiedergeben möchten, als es derzeit der Fall ist.

Literatur

ALBRING, W. (1978): Angewandte Strömungslehre. – 5. Aufl., 403 S., 443 Abb. – Berlin (Akademie-Verlag).

BERGER, M. & J. S. HART (1974): Physiology and energetics of flight. – S. 415–477, 10 Abb. – in: FARNER, D. S. & J. R. KING (Eds.): Avian biology, Bd. IV. – 504 S., 95 Abb. – New York–San Francisco–London (Acad. Press).

BERNDT, R. & W. MEISE (1962): Naturgeschichte der Vögel, Bd. 2. – 697 S., 468 Abb., 44 Taf. – Stuttgart (Franck).

BROWN, L. (1979): Die Greifvögel. – 256 S., 140 Abb. – Hamburg–Berlin (Paray).

BRÜLL, H. (1968): Unterfamilie Habichte. – S. 351–358, 15 Abb., 1 Taf. – in: GRZIMEK, B., W. MEISE, G. NIETHAMMER, J. STEINBACHER & E. THENIUS (Eds.): Grzimeks Tierleben, Bd. 7. – 564 S., 375 Abb., 99 Taf. – Zürich (Kindler).

BRUNS, H. (1975): Ullstein Vogelbuch. – 344 S., 24 Abb., 24 Taf. – Frankfurt a. M.–Berlin–Wien (Ullstein).

GLUTZ VON BLOTZHEIM, U. N. (Ed.) (1971): Handbuch der Vögel Mitteleuropas, Bd. 4. – 943 S., 126 Abb., 3 Taf. – Frankfurt a. M. (Akad. Verlagsgesellsch.).

HEINZEL, H., R. FITTER & J. PARSLOW (1977): Pareys Vogelbuch. – 2. Aufl., 334 S., 2255 Abb., 585 Kart. – Hamburg–Berlin (Parey).

HOLST, E. VON & D. KÜCHEMANN (1941): Biologische und aerodynamische Probleme des Tierfluges. – Naturw. **29:** 348–362, 16 Abb. – Berlin.

HUMMEL, D. (1980): The aerodynamic characteristics of slotted wing-tips in soaring birds. – Acta XVII Congr. Internat. Ornithol.: 391–396, 3 Abb. – Berlin.

KNAPPE, H. & S. WAGNER (1985): Die aeroelastische Deformation von Vogelflügeln und ihr Einfluß auf die Profilpolaren. – S. 25–44, 14 Abb. – in: NACHTIGALL, W. (Ed.): BIONA-report 3. – 509 S., 247 Abb., 17 Taf. – Stuttgart–New York (Fischer).

MAKATSCH, W. (1969): Wir bestimmen die Vögel Europas. – 2. Aufl., 516 S., 66 Abb., 112 Taf., 384 Kart. – Radebeul (Neumann).

— (1983): Vögel. – S. 119–278, 48 Abb., 44 Taf. – in: STRESEMANN, E., K. SENGLAUB & H.-J. HANNEMANN (Eds.): Exkursionsfauna, Bd. 3. – 8. Aufl., 370 S., 476 Abb., 48 Taf. – Berlin (Volk u. Wissen).

NACHTIGALL, W. & D. BILO (1980): Strömungsanpassung des Pinguins beim Schwimmen unter Wasser. – J. Comp. Physiol. **137:** 17–26, 4 Abb. – Heidelberg–Berlin–New York.

NACHTIGALL, W. & A. KLIMBINGAT (1985): Messung der Flügelgeometrie mit der Profilkamm-Methode und geometrische Flügelkennzeichnung einheimischer Eulen. – S. 45–86, 22 Abb., 1 Taf. – in: NACHTIGALL, W. (Ed.): BIONA-report 3. – 509 S., 247 Abb., 17 Taf. – Stuttgart–New York (Fischer).

OEHME, H. (1968): Der Kraftflug der Vögel. – Vogelwelt **89:** 20–42, 13 Abb. – Berlin–München.

— (1980): Schmalfilmkinematografie und Kleinbildfotografie bei der Untersuchung des Vogelfluges. – Milu **5:** 133–145, 7 Abb. – Berlin.

— (1981): Fliegen. – S. 89–105, 7 Abb. – in: SCHILDMACHER, H.: Einführung in die Ornithologie. – 283 S., 70 Abb., 16 Taf. – Jena (VEB G. Fischer).

— (1985a): Möglichkeiten und Grenzen der Flugleistungsbestimmung unter Verwendung aerodynamisch begründeter Rechenmodelle. – S. 231–254, 10 Abb. – in: NACHTIGALL, W. (Ed.): BIONA-report 3. – 509 S., 247 Abb., 17 Taf. – Stuttgart–New York (Fischer).

— (1985b): Über die Flügelbewegung der Vögel im schnellen Streckenflug. – Milu **6:** 137–156, 10 Abb. – Berlin.

— & U. KITZLER (1975a): Zur Geometrie des Vogelflügels. – Zool. Jb. Physiol. **79:** 402–424, 9 Abb. – Jena.

— — (1975b): Die Bestimmung der Muskelleistung beim Kraftflug der Vögel aus kinematischen und morphologischen Daten. – Zool. Jb. Physiol. **79:** 425–458, 13 Abb. – Jena.

— H. H. DATHE & U. KITZLER (1977): Flight energetics in birds. – Fortschr. Zool. **24**/2–3: 257–273, 6 Abb. – Stuttgart–New York.

PENNYCUICK, C. J. (1968): A wind-tunnel study of gliding flight in the pigeon *Columba livia*. – J. Exp. Biol. **49:** 509–526, 16 Abb. – London.

— (1971): Control of gliding angle in Rüppell's Griffon Vulture *Gyps rüppellii*. – J. Exp. Biol. **55:** 39–46, 3 Abb., 2 Taf. – London.

PFORR, M. & A. LIMBRUNNER (1980): Ornithologischer Bildatals der Brutvögel Europas, Bd. 1. – 334 S., 454 Abb., 151 Taf., 151 Kart. – Neudamm-Melsungen (Neumann).

PETERSON, R., G. MOUNTFORT & P. A. D. HOLLOM (1976): Die Vögel Europas. – 11. Aufl. 466 S., 41 Abb., 76 Taf., 339 Kart. – Hamburg–Berlin (Parey).

POUNDS, H. E. (1936): Notes on the flight of the Sparrow-Hawk. – Brit. Birds **30:** 22–26. – Bedford.

PRANDTL, L. (Ed.) (1923): Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, 2. Liefg. – 2. Aufl., 80 S., 102 Abb. – München–Berlin (Oldenbourg).

THIENEMANN, J. (1928): Rossitten. – 2. Aufl., 328 S., 159 Abb. – Neudamm (Neumann).

WEICK, F. (1980): Die Greifvögel der Welt. – 159 S., 160 Abb., 40 Taf. – Hamburg–Berlin (Parey).