

Aus der Schweizerischen Vogelwarte Sempach

## Sturzflüge von Wanderfalke *Falco peregrinus* und Wüstenfalke *F. pelegrinoides*

Dieter Peter und Matthias Kestenholz

**Stoops of Peregrine Falcon *Falco peregrinus* and Barbary Falcon *F. pelegrinoides*.** – Two stoops of Peregrine Falcons and two of Barbary Falcons were measured with a tracking radar. For the Peregrine Falcons, total altitude losses while diving were 250 m and 350 m. Steepest diving angles amounted to 42° and 40°, respectively. Maximal air speeds of 36 and 51 m/s (130 and 184 km/h) were recorded. For the Barbary Falcons, the corresponding values are height losses of 173 m and 189 m, diving angles of 20° and 34°, and maximal air speeds of 42 and 44 m/s (150 and 158 km/h). The 51 m/s (184 km/h) of a Peregrine Falcon represents the highest air speed of a bird accurately measured so far.

Key words: *Falco peregrinus*, *Falco pelegrinoides*, stooping, flight speed, flight mechanics, tracking radar.  
Dieter Peter und Matthias Kestenholz, Schweizerische Vogelwarte, CH–6204 Sempach

Der Wanderfalke gilt als schnellstfliegende Vogelart (Rayner 1985, del Hoyo et al. 1994). Sein Sturzflug wird verschiedentlich sogar als schnellste Form der Fortbewegung im Tierreich angesehen; die Geschwindigkeitsangaben reichen bis zu 100 m/s (Engelmann 1928, Lawson 1930, Hantge 1968). Verlässliche Angaben sind aber spärlich, bedingt durch die methodischen Schwierigkeiten exakter Messungen. Zuverlässige Daten fanden wir einzig bei Alerstam (1987). Im Rahmen von Vogelzugstudien mittels Zielfolgeradar konnten die exakten Flugbahnen bei vier Sturzflügen von je zwei Wander- und Wüstenfalken *Falco peregrinus* und *F. pelegrinoides* vermessen werden.

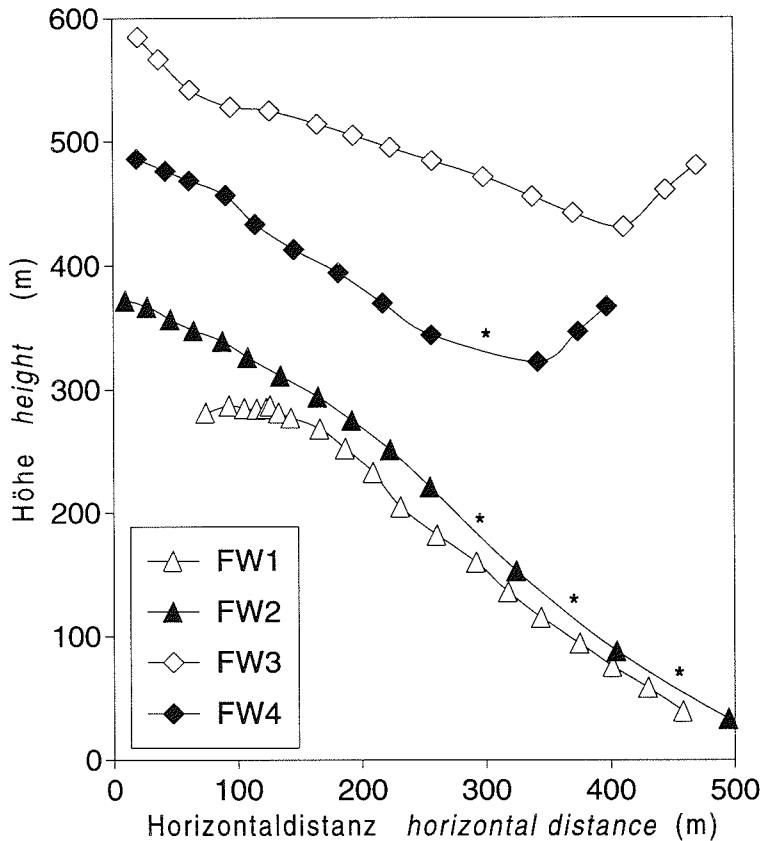
### 1. Material und Methoden

Beobachtungsort für die beiden Wanderfalken waren die Salinen Salobrar de Campos, SE-Mallorca, Spanien (39°19' N, 03°05' E). Die Flugwege (FW1 und FW2) zweier Wanderfalken von 138 beziehungsweise 93 s gesamter Registrierdauer wurden am 16. August 1996 um 10.21 h bzw. am 17. August 1996 um 10.15 h aufgezeichnet. Die beiden Wüstenfalken wurden im israelischen Arava-Tal 40 km süd-

lich des Toten Meeres bei Hazewa (30°49' N, 35°16' E) beobachtet und deren Flugwege während 200 resp. 260 s aufgezeichnet. FW3 wurde am 5. Mai 1992 um 11.33 h, FW4 am 13. Mai 1992 um 11.38 h registriert. Der letztere stammt von einem ♀.

Zur Registrierung der Daten wurde ein Zielfolgeradar vom Typ Superfledermaus verwendet (X-Band, 150 kW Spitzenleistung, 0,3 µs Impulslänge, 2,082 kHz Pulsrepetitionsfrequenz, 2,2° Strahlöffnungswinkel; für Details siehe Bloch et al. 1981, Bruderer et al. 1995). Die Position der verfolgten Individuen im Raum (Raumkoordinaten) wurde jede Sekunde gespeichert, bei hohen Änderungen der Raumkoordinaten (> 40 m/s) nur alle zwei Sekunden. Mit dem auf dem Richtgerät des Radars montierten Fernrohr (12,4fache Vergrößerung) wurden die Falken identifiziert. In Mallorca war eine Verfolgung bis etwa 30 m über Boden möglich. Tiefer waren die Vögel vom Radarstandort aus nicht mehr sichtbar, da eine Geländekuppe die Sicht verdeckte.

Die horizontalen Windrichtungen und -geschwindigkeiten wurde durch Verfolgen eines Ballones gemessen und mit den Flugbahnparametern der verfolgten Vögel verrechnet. Die berücksichtigten Windmessungen für die Wü-



**Abb. 1.** Flugwege der Wanderfalken (FW1 und FW2) und der Wüstenfalken (FW3 und FW4) im Bereich des Sturzfluges. Die mit \* bezeichneten Intervalle dauerten 2 s, die übrigen Datenpunkte sind nur durch 1 s getrennt. – *Flight-path profiles of the stoops of the Peregrine Falcons (FW1 and FW2) and of the Barbary Falcons (FW3 and FW4) recorded by radar. Time intervals indicated by \* lasted 2 s, all the other data-points are separated by 1 s only.*

stenfalken stammen jeweils von 12 h. Bei der Registrierung der beiden Flugwege der Wanderfalken herrschte praktisch Windstille. Über vertikale Luftbewegungen stehen uns keine Messwerte zur Verfügung.

Die Messgenauigkeit (maximaler Winkelfehler) des verwendeten Radarsystems beträgt bei nicht geradliniger Flugbahn ca.  $\pm 0,056^\circ$ . Für ein verfolgtes Objekt in einer Distanz von 1 km würde dies einem maximalen Geschwindigkeits-Messfehler von  $\pm 2$  m/s entsprechen, bei 2 km Distanz  $\pm 4$  m/s. Bei über längere Zeit geradlinigen Flugbahnen verringert sich der Messfehler, weil das Radarrechnergerät eine lineare Flugbahn des jeweils verfolgten Objektes zur Steuerung des Richtgerätes vorausberechnet. Bei den vorliegenden Sturzflügen handelt es sich um mehr oder weniger geradlinige,

aber nicht sehr lange Flugwege. Durch Berechnen des gleitenden Mittelwertes über 5 s erreichen wir in allen Fällen eine Reduktion des Messfehlers auf weniger als  $\pm 1$  m/s.

## 2. Ergebnisse

Bei allen vier Vögeln wurden während der gesamten Flugwege keine Flügelschläge beobachtet.

Der Wanderfalken mit FW1 beschleunigte seine Fluggeschwindigkeit aus 268 m Höhe innerhalb von 8 s von 8 m/s (29 km/h) auf maximal 36 m/s (130 km/h). Diese Maximalgeschwindigkeit war bereits etwa 115 m über Boden erreicht. Danach flachte der Falke seinen Gleitwinkel leicht ab, was auch seine Ge-

**Tab. 1.** Messpunkte der Sturzflüge FW1 und FW2 von Wanderfalken. Die Zeit gibt an, wie lange der entsprechende Flugweg registriert wurde (1- oder 2-s-Intervall). Gleitwinkel, Geschwindigkeit und Beschleunigung werden jeweils als gleitende Mittelwerte über 5 s angegeben, um Messungenauigkeiten des Zielfolgeradars auszugleichen. Windmessungen wurden um 8.07 h beziehungsweise 7.55 h gemacht; es herrschte nahezu Windstille. – *Radar measurements on stoops of Peregrine Falcons FW1 and FW2. «Zeit» indicates the time since the track of a bird was registered (1 or 2 s intervals). Gliding angle («Gleitwinkel»), speed («Geschwindigkeit») and acceleration («Beschleunigung») are given as a running mean including the data of the preceding 5 s, to eliminate a certain inaccuracy of the tracking radar. Wind measurements were taken at 8.07 h and 7.55 h respectively; conditions were very calm.*

Flugweg FW 1 (Wanderfalken)					Flugweg FW 2 (Wanderfalken)				
Zeit	Höhe	Gleitwinkel	Geschwindigkeit	Beschleunigung	Zeit	Höhe	Gleitwinkel	Geschwindigkeit	Beschleunigung
(s)	(m)	(°)	(ms <sup>-1</sup> )	(ms <sup>-2</sup> )	(s)	(m)	(°)	(ms <sup>-1</sup> )	(ms <sup>-2</sup> )
125	281	3	8	-2,07	74	378	2	10	-0,5
126	277	6	8	-0,34	75	376	10	10	-0,09
127	268	9	15	3,01	76	373	12	10	-0,25
128	252	18	15	3,61	77	372	11	11	0,86
129	233	32	20	5,14	78	367	13	12	1,43
130	205	35	25	5,29	79	357	15	14	2,33
131	182	38	31	5,31	80	348	18	17	2,56
132	160	41	33	2,71	81	339	19	19	2,47
133	136	42	35	1,86	82	326	25	22	2,33
134	115	41	36	0,86	83	311	27	24	2,49
135	94	38	36	0,31	84	294	28	27	2,63
136	75	37	35	-0,89	85	275	30	29	2,41
137	58	36	34	-1,06	86	251	33	32	2,89
138	39	35	34	-0,19	87	221	35	36	3,99
					89	153	38	41	3,52
					91	88	40	46	4,69
					93	33	38	51	2,88

geschwindigkeit reduzierte. Die maximale Beschleunigung im gesamten Flugweg lag bei 5,3 m/s<sup>2</sup> bei einer momentanen Geschwindigkeit von 31 m/s (112 km/h) und einem Gleitwinkel von 38°.

Der Wanderfalken mit FW2 beschleunigte aus 372 m Höhe in 16 s von einer Anfangsgeschwindigkeit von 11 m/s (40 km/h) auf eine Maximalgeschwindigkeit von 51 m/s (184 km/h) in 38 m Höhe über Boden. In diesem Fall resultierte eine maximale Beschleunigung von 4,7 m/s<sup>2</sup> im steilsten, letzten Teil der registrierten Flugbahn (Abb. 1, Tab. 1).

Der Wüstenfalken mit FW3 beschleunigte seinen Flug von 604 auf 431 m über Boden in 14 s von 16 m/s (58 km/h) auf eine maximale Eigengeschwindigkeit von 42 m/s (150 km/h) bei einem durchschnittlichen Neigungswinkel

der Flugbahn von lediglich 20°. Der relativ flachen Flugbahn entsprechend liegen die höchsten Beschleunigungswerte bloss bei etwas mehr als 2 m/s<sup>2</sup>. Sie wurden im mittleren Abschnitt des Sturzfluges registriert, wobei die momentane Eigengeschwindigkeit 31 m/s (112 km/h) betrug.

Der Wüstenfalken mit FW4 stürzte in 13 s von 511 m mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 14 m/s (51 km/h) auf 322 m über Boden und erreichte dabei eine maximale Eigengeschwindigkeit von 44 m/s (158 km/h). Die maximale Beschleunigung von 4 m/s<sup>2</sup> wurde bei einer momentanen Eigengeschwindigkeit von bereits 37 m/s (133 km/h) bei einem Gleitwinkel von 35° registriert. Für beide Wüstenfalken bleibt unklar, ob es sich um Jagdflüge oder um Flugspiele handelte.

### 3. Diskussion

#### 3.1. Höchstgeschwindigkeiten

Die beim Flugweg FW2 des Wanderfalken gemessene Maximalgeschwindigkeit von 51 m/s (184 km/h) entspricht dem höchsten uns bekannten Messwert einer Eigengeschwindigkeit eines Vogels. Noch höhere Angaben sind methodisch bedingt mit sehr grossen Ungenauigkeiten behaftet. Diesen Schätzwerten liegen Beobachtungen von Piloten (z.B. Lawson 1930) oder mit einer Stoppuhr ermittelte Zeitangaben für das Zurücklegen einer nicht exakt messbaren Strecke zugrunde (z.B. Hantge 1968); ausserdem wurden die Windverhältnisse nicht berücksichtigt. Alle uns aus der Literatur bekannten zuverlässigen Messwerte liegen tiefer. Alerstam (1987) konnte für die Sturzflüge eines Wanderfalken und eines Habichts *Accipiter gentilis* mittlere Geschwindigkeiten von etwa 25 m/s (90 km/h) messen. Für einen männlichen Baumfalken *Falco subbuteo* wurde eine maximale Geschwindigkeit von 30 m/s (108 km/h) festgestellt (Alerstam 1987). Ebenfalls mit Zielfolgeradar gemessene Sturzflüge eines Zwergadlers *Hieraaetus pennatus* und eines Falken (wahrscheinlich eines Turmfalken *Falco tinnunculus*) aus Südspanien erreichten maximale Eigengeschwindigkeiten von 38 m/s (135 km/h) beziehungsweise 33 m/s (118 km/h) (unpubl. eigene Daten). Zwar werden auch für Segler (Apodidae) Rekordwerte von Geschwindigkeiten postuliert, doch dürfte es sich hier oft um durch Wind oder Messfehler erhöhte Werte handeln. Radarmessungen der Eigengeschwindigkeiten von Mauerseglern *Apus apus* ergaben Höchstwerte bis 60 km/h (Bruderer & Weitnauer 1972).

#### 3.2. Theoretische Vergleiche

Bei der höchsten von uns gemessenen Eigengeschwindigkeit eines Vogels von 51 m/s (184 km/h), bei Flugweg FW2 eines Wanderfalken, drängen sich Vergleiche mit theoretischen Voraussagen auf. Als maximaler Grenzwert kann dabei der freie Fall herangezogen werden. Zur Vereinfachung wird der Luftwiderstand vorerst nicht berücksichtigt.

$$v_t = \sqrt{v_0^2 + 2gh} \quad (1)$$

Für Flugweg FW2 würde bei einer Fallhöhe  $h$  von 350 m und einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  von 11 m/s eine Endgeschwindigkeit  $v_t$  von 83,6 m/s resultieren. Der gemessene Wert erreichte somit 61 % dieses theoretisch maximalen Grenzwertes ohne Luftwiderstand ( $c_w = 0$ ). Die restliche Energie wurde durch den effektiv vorhandenen Luftwiderstand «verbraucht». Noch höhere Geschwindigkeiten bedingen eine wesentlich grössere Fallhöhe. Für einen idealen Falken im senkrechten Sturzflug berechnete Tucker (1998) theoretische Höchstwerte von mehr als 140 m/s.

Die zu erwartende Endgeschwindigkeit lässt sich nach der flugmechanischen Theorie berechnen. Sie ist dann erreicht, wenn sich auf einer Sinkflugbahn mit einem gegebenen Gleitwinkel  $\beta$  der schwerkraftbedingte Vortrieb und der gesamte Luftwiderstand entsprechen (Pennycuick 1975, Andersson & Norberg 1981). Vereinfacht gilt bei steilen Gleitwinkeln:

$$m \cdot g \cdot \sin \beta = \frac{c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v_t^2}{2} \quad (2)$$

wobei  $m$  = Masse des Vogels,  $g$  = Erdbeschleunigung,  $\beta$  = Gleitwinkel,  $c_w$  = Widerstandsbeiwert,  $A$  = Frontalfläche von Körper und Flügeln sowie  $\rho$  = Luftdichte. Daraus lässt sich  $c_w$  berechnen:

$$c_w = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \sin \beta}{v_t^2 \cdot A \cdot \rho} \quad (3)$$

Folgende Werte wurden berücksichtigt:  $m = 0,9$  kg für Wanderfalken bzw.  $0,7$  kg für Wüstenfalken (Cramp & Simmons 1980),  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>,  $A = 0,012$  m<sup>2</sup> und  $\rho = 1,22$  kg/m<sup>3</sup>. Für die 4 Flugwege ergeben sich die in Tab. 2 dargestellten Widerstandsbeiwerte.

Die am schnellsten fliegenden oder schwimmenden Tiere weisen eine ideale Spindelform auf, bei der Körperlänge und Körperdurchmesser im Verhältnis 4 : 1 stehen. Ähnliche Stromlinienkörper erreichen einen Widerstandsbeiwert von  $c_w = 0,08$ .

**Tab. 2.** Unter Anwendung der Formel (3) berechnete Widerstandsbeiwerte  $c_w$  und die dazugehörigen Reynold'schen Zahlen  $Re$ . – *Theoretical calculations for the coefficients of drag  $c_w$  with the formula (3).  $v_t$  = measured terminal speed,  $\beta$  = measured gliding angle,  $m$  = assumed body mass,  $A$  = assumed frontal area,  $Re$  = Reynold's numbers.*

		$v_t$ (m/s)	$\beta$	$m$ (kg)	$A$	$c_w$	$Re$
FW1	<i>Falco peregrinus</i>	36	42	0,9	0,012	0,6227	$1,07 \times 10^6$
FW2	<i>Falco peregrinus</i>	51	40	0,9	0,012	0,2981	$1,52 \times 10^6$
FW3	<i>Falco pelegrinoides</i>	42	20	0,7	0,010	0,2183	$1,11 \times 10^6$
FW4	<i>Falco pelegrinoides</i>	44	34	0,7	0,010	0,3252	$1,17 \times 10^6$

Die gemessene Geschwindigkeit von 51 m/s bei FW2 stellt nicht die maximal erreichbare Geschwindigkeit dar, da der Vogel zum Zeitpunkt der Messung noch immer beschleunigte. Letztere würde erst nach etwa 1200 m Fallhöhe erreicht (Tucker 1998).

Durch das Abspreizen seiner Flügel kann der Falke seinen gesamten Luftwiderstand aktiv vergrössern (Tab.2). Dadurch werden Gleitwinkel und Geschwindigkeit kontrollierbar, und die Manövrierfähigkeit verbessert sich.

Der steile Jagdflug mit hoher Geschwindigkeit stellt spezielle Anforderungen an den Körperbau und die Koordinationsfähigkeit des Vogels. Beim Steuern und vor allem beim Abbremsen zum Schlagen der Beute wirken starke Kräfte. Nachtigall (1985) vermutet, dass die Beute allein durch den Aufprallsschock (Aufprallimpuls) getötet wird. Für 6 amerikanische Greifvogelarten wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera die Geschwindigkeiten im Augenblick des Beuteschlagens erfasst (Goslow 1971): Für den Kopf des Wanderfalke wurden 14,6 m/s (53 km/h) gemessen, für den Kopf des Habichts 14,0 m/s (50 km/h) und für die Füsse des Habichts 22,5 m/s (81 km/h), da sich der Körper des Greifvogels kurz vor dem Zugreifen stark dreht. Die Geschwindigkeiten unmittelbar beim Beuteschlagen sind also deutlich tiefer als während des Sturzflugs. Das Abbremsen in der Endphase erhöht die Manövrierfähigkeit beim exakten Ansteuern des Beutevogels. Dieser kann mit drei verschiedenen Taktiken versuchen, dem im offenen Luftraum jagenden Falken zu entweichen: horizontal maximal beschleunigen, maximal aufsteigen oder «Haken schlagen» (Hedenström & Alerstam 1995).

**Dank.** Thomas Steuri ermöglichte durch eine spezielle Anpassung seines Radardaten-Registrierprogramms die Verwendung der Positionsdaten im Sekundentakt. Wertvolle Kommentare zum Manuskript erhielten wir von Thomas Alerstam, Bruno Bruderer, Felix Liechti, Beat Naef-Daenzer, Reto Spaar und zwei Reviewern. Besonders hilfreich waren die Hinweise von Prof. Dr. Werner Nachtigall. Gabriele Hilke Peter fertigte das Résumé an. Diese Arbeit ist Teil des Projekts Nr. 31-43242.95 des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung.

#### Zusammenfassung, Résumé

Je zwei Sturzflüge von Wanderfalke *Falco peregrinus* und Wüstenfalke *Falco pelegrinoides* wurden mit Zielfolgeradar gemessen. Bei den zwei Wanderfalke betragen die totalen Höhenverluste während der Sturzflüge 250 und 350 m. Die steilsten Abschnitte der beiden Flugbahnen wiesen Gleitwinkel von 42° resp. 40° auf. Die maximal gemessenen Gleitgeschwindigkeiten betragen 36 und 51 m/s (130 und 184 km/h). Für die beiden Wüstenfalke betragen die Höhenverluste 173 und 189 m, die Gleitwinkel 20° und 34° und die maximalen Gleitgeschwindigkeiten 42 und 44 m/s (150 und 158 km/h). Die 51 m/s (184 km/h) eines Wanderfalke sind unseres Wissens die bislang höchste exakt gemessene Eigengeschwindigkeit eines Vogels.

#### Vol en piqué du Faucon pèlerin *Falco peregrinus* et du Faucon de Barbarie *F. pelegrinoides*

Les vols en piqué de deux faucons pèlerins *Falco peregrinus* et de deux faucons de Barbarie *Falco pelegrinoides* ont été mesurés au moyen d'un radar de conduite de tir. Les pertes totales en altitude pendant les piqués des deux faucons pèlerins se situaient entre 250 et 350 m. L'angle de descente atteignait au maximum 42°, resp. 40° et les vitesses maximales étaient de 36 et 51 m/s (130 et 184 km/h). Les valeurs les plus élevées atteintes par les deux faucons de Barbarie sont les suivantes: les différences d'alti-

tude comportaient 173 et 189 m, les angles de descente 20° et 34° et les vitesses 42 et 44 m/s (150 et 158 km/h). D'après nos connaissances, la vitesse de 51 m/s (184 km/h) atteinte par l'un des faucons pèlerins est, pour l'instant, la vitesse propre la plus élevée d'un oiseau jamais mesurée exactement.

### Literatur

- ALERSTAM, T. (1987): Radar observations of the stoop of the Peregrine Falcon *Falco peregrinus* and the Goshawk *Accipiter gentilis*. Ibis 129: 267–273.
- ANDERSSON, M. & R. Å. NORBERG (1981): Evolution of reversed sexual size dimorphism and role partitioning among predatory birds, with a size scaling of flight performance. Biol. J. Linn. Soc. 15: 105–130.
- BLOCH, R., B. BRUDERER & P. STEINER (1981): Flugverhalten nächtlich ziehender Vögel – Radardaten über den Zug verschiedener Vogeltypen auf einem Alpenpass. Vogelwarte 31: 119–149.
- BRUDERER, B., T. STEURI & M. BAUMGARTNER (1995): Short-range high-precision surveillance of nocturnal migration and tracking of single targets. Isr. J. Zool. 41: 207–220.
- BRUDERER, B. & E. WEITNAUER (1972): Radarbeobachtungen über Zug und Nachtflüge des Mauerseglers. Rev. Suisse Zool. 79: 1190–2000.
- CRAMP, S. & K. E. L. SIMMONS (1980): Handbook of the Birds of Europe, the Middle East and North Africa: the Birds of the Western Palearctic. Vol. 2. Oxford University Press, Oxford.
- DEL HOYO, J., A. ELLIOTT & J. SARGATAL (1994): Handbook of the Birds of the World. Vol. 2. New World Vultures to Guineafowl. Lynx Edicions, Barcelona.
- ENGELMANN, F. (1928): Die Raubvögel Europas. J. Neumann, Neudamm.
- GLUTZ VON BLOTZHEIM, U. N., K. M. BAUER & E. BEZZEL (1971): Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Band 4, Falconiformes. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main.
- GOSLOW, G. E. (1971): The attack and strike of some North American raptors. Auk 88: 815–827.
- HANTGE, E. (1968): Zum Beuteerwerb unserer Wanderfalken (*Falco peregrinus*) Ornithol. Mitt. 20: 211–217.
- HEDENSTRÖM, A. & T. ALERSTAM (1995): Optimal flight speeds of birds. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 348: 471–487.
- LAWSON, R. (1930): The stoop of a hawk. Bull. Essex County Ornithol. Club 12: 79–80.
- NACHTIGALL, W. (1985): Warum die Vögel fliegen. Rasch und Röhring Verlag, Hamburg und Zürich.
- PENNYCUICK, C. J. (1975): Mechanics of flight. In D. S. FARNER & J. R. KING (eds): Avian Biology Vol. V: 1–75. Academic Press, New York.
- RAYNER, J. M. V. (1985): Speeds of flight. In B. CAMPBELL & E. LACK (eds): A Dictionary of Birds: 224–226. T. & A. D. Poyser, Calton.
- TUCKER, V. A. (1998): Gliding flight: speed and acceleration of ideal falcons during diving and pull out. J. exp. Biol. 201: 403–414.

Manuskript eingegangen 16. Januar 1998  
Revidierte Fassung angenommen 6. Februar 1998