

Abspringen macht das Abfliegen leichter

Wasservögel stoßen sich beim Auffliegen manchmal mit heftigen Beinschlägen oder -platschern ab. Insekten springen oft mit den Hinterbeinen ein Stück hoch. Wichtig ist, dass sie schon ganz zum Anfang ihres Flugs etwas „Fahrtwind“ erzeugen. Hierbei kann der Spring die allerersten Flügelschläge unterstützen. Er hilft auch, die Flügelspitzen vor Boden- oder Wasserberührung zu schützen.



Größte und kleinste Vögel:

Kleinste Vogel

Wie die kleinsten fossilen Vögel ausgesehen haben wissen wir nicht. Heute ist der absolute Winzling wohl der Hummelkolibri *Mellisuga helenae* mit einer Flügelspannweite von 9 cm und einer Masse um die 2 g. Er kann mit einer Schlagfrequenz von mindestens 50 Hz aktiv dauerfliegen, so lange er Treibstoff hat.

Größter jemals bekannter Vogel

Die absoluten Riesen unter den Großvögeln konnten vielleicht doch fliegen, wenn auch nur in den Anden-Aufwinden oder Thermiken segeln: *Argentavis magnificens*, mit einer Spannweite von 7,5 m der vermutlich größte Vogel, der jemals gelebt hat, vor etwa sechs Millionen Jahren in Argentinien. Er soll nur 72 kg gewogen und im Gleitflug an die 100 km/h erreicht haben.

Größte Flügelspannweite heute

Heute ist einer der größten Vögel der Andenkondor (*Vultur gryphus*). Im Durchschnitt erreicht er eine Spannweite von 2,90 m, bei einer Masse von 11,4 kg. Einzelmessungen an sehr großen Männchen haben 3,10 m und 15 kg gebracht. Damit ist er hart an der Grenze der Fähigkeit zum aktiven Flug. Mit Schlagfrequenzen um 1 Hz kann er diesen noch ausführen, jedoch nur kurzfristig. Für längere Flüge kommt er nicht ohne die Anden-Aufwinde aus.

7500 Mal soviel Masse, aber gleich schnell

Heute unterscheiden sich die Vögel in ihren Spannweiten also um den Faktor 34, in ihren Massen dagegen um den Faktor 7500 (Extremfall). Interessant ist, dass die Zwerge und die Riesen etwa gleich schnell fliegen können, nämlich rund 50 km/h. Was begrenzt nun die Massen nach oben und nach unten?

Evolutive Massenbegrenzung nach oben

Vögel müssen, wie alle nicht parasitischen Tiere, ihre Energie aus dem eigenen Stoffwechsel bereitstellen, pro Zeiteinheit also eine gewisse Energiemenge aufbringen, die man als Stoffwechselleistung bezeichnet. Für den Flug müssen sie eine gewisse physikalische Leistung ausgeben, die Flugleistung. Solange sie in der Lage sind, eine Stoffwechselleistung aufzubringen, die größer ist als die für einen bestimmten Flugzustand nötige Flugleistung, können sie in diesem Flugzustand fliegen.

Beide Leistungen steigen exponentiell mit der Körpermasse. Die Flugleistung beginnt auf einem tieferen Niveau, steigt aber schneller als die Stoffwechselleistung. Es stellt sich heraus, dass sich die Leistungskurven bei einer Körpermasse von 12 kg schneiden. Bei dieser Masse muss ein Vogel fast seine gesamte aufbringbare Leistung in den Flug stecken, so dass die anderen Lebensfunktionen gerade noch abgedeckt werden können. Heute sind die größten Vögel mit max. 3,25 m der Wanderalbatros (*Diomedea exulans*) und der schon erwähnte Andenkondor.

Entwicklung bis hart an die physikalische Grenze

Es ist nun interessant zu sehen, wie weit die Evolution die Vögel an diese physikalische Grenze herangeführt hat. Die mittlere Körpermasse für die schwersten noch gut flugfähigen Vögel unserer Zeit (Höckerschwan *Cygnus olor*, Kalifornischer Kondor *Gymnogyps californianus*, Rosapelikan *Pelecanus onocrotalus*; Riesentrappe *Ardeotis kori*) liegt bei etwa 18-20 kg.

Diese Tiere können gerade noch aktiv dauerfliegen. Höhere Körpermassen, wie sie zum Beispiel bei schweren Trappenhähnen auftreten können, lassen nur noch kurze Lufthopser zu. Es sei denn, Energie kommt von außen, letztlich von der Sonne: Thermiken und anderen Aufwinden. Beziehen Vögel mit Körpermassen bis etwas über 15 kg dies mit ein, können sie energetisch noch existieren, wie der Andenkondor zeigt. Hier ist die evolutive Entwicklung in der Tat bis hart an die physikalische Grenze vorgedrungen.



Rostbauchamazilie (*Amazilia amazilia*)



Gänsegeier (*Gyps fulvus*)

Massenbegrenzung nach unten

Auf der anderen Seite zeigt die Auftragung, dass die kleinsten Arten kein Problem haben, die nötige Flugleistung über den Stoffwechsel zu finanzieren; sie sind „energetische Riesen“. Pro Masseneinheit sind ihre Muskeln viel leistungsfähiger als die Muskeln der „morphologischen Riesen“.

Die Kleinen sind „energetische Riesen“, aber sie leben gefährlich!

Voraussetzung ist allerdings, dass sie immer so viel Nahrung zur Verfügung haben, dass der Stoffwechsel auf Hochtouren laufen kann. Kolibris müssen dafür praktisch pausenlos Nektar aufnehmen. Wenn

sie des nachts ausruhen, schrauben sie ihren Stoffwechsel und damit ihre Körpertemperatur zur Energieeinsparung herunter (*Torpor*). Das gilt auch für die kleinsten Vögel unserer Breiten, die Goldhähnchen (Gattung *Regulus*). Trotz nächtlichen Torpors ist ihr Tank in der Frühe weitgehend leer, so dass sie sofort wieder mit der Nahrungsaufnahme fortfahren müssen. Gelingt das nicht, sind sie in einem weiteren halben Tag tot.

Energetische Beziehungen, die letztlich physikalische Zwangsläufe widerspiegeln – Oberflächen-Massen-Verhältnisse etwa – beherrschen also auch das Leben und seine Evolution bis in die Details. Das gilt auch für den Vogelzug.



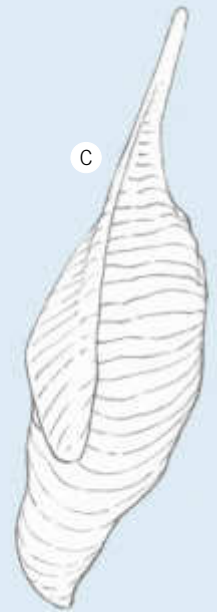
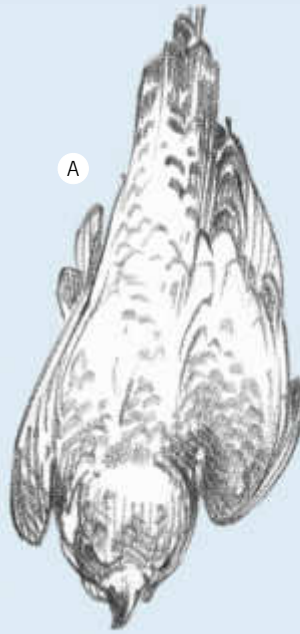
Afrikanischer Strauß (*Struthio camelus*)

Vergleiche sind nur zwischen gleichartigen „ökologischen Typen“ sinnvoll. Bei flugfähigen Vögeln hatten wir ein maximales Massenverhältnis von 7500 : 1 berechnet. Ein Afrikanischer Strauß wiegt an die 100 kg. Das Massenverhältnis zum kleinsten Kolibri wäre rein numerisch siebenmal so groß. Der Vergleich macht aber vom funktionellen Standpunkt aus wenig Sinn.

Falken: Die schnellsten Tiere der Welt



Gerfalke (*Falco rusticolus*)





Im Sturzflug 90 m/s und mehr

Rechts: Zwischen zwei der abgebildeten Fotos rechts liegt jeweils 1/60 Sekunde. Damit fliegt der Gerfalke gegen ruhenden Hintergrund in 1/12 s etwa 2 m, also 24 m/s oder 86 km/h – für einen Vogel ist das schon beachtlich. Am schnellsten ist der Wanderfalk, der im Sturzflug kurzfristig bis über 340 km/h (95 m/s) erreichen kann. Hier aber fliegt der Falke einer am Faden im Kreis geschwungenen Beuteatrappe hinterher, die der Falkner im richtigen Moment fliegen lässt, am Falkner vorbei. Anfangs „kommt er aus der Kurve“ und arbeitet mit voll gespreizten und fast senkrecht stehenden Flügeln massiv gegen die Zentrifugalkraft, die bestrebt ist, ihn aus der Kurve zu tragen. Gegen Ende der Bildserie schwenkt er in die normale Flughaltung ein; die Flügel nähern sich wieder der Waagrechten und legen sich etwas zusammen. Es fällt auf, dass der Kopf auch bei den extremen senkrechten Flügelstellungen voll waagrecht ausgerichtet bleibt; er steht also zu Beginn um 90° gegen die Flügelebene verdreht. So behält der Falk auch bei einem solchen Manöver die optische Raumorientierung bei.

Detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen

Die detailliertesten Analysen (Ponitz et al 2014) stammen von trainierten Wanderfalken, die einer 60 m hohen, steilen Talsperren-Wand entlang hinunterstürzten. Sie erreichen noch nicht die Extremgeschwindigkeiten wie im freien Luftraum (bis 320 km/h), aber doch schon an die 80 km/h. Ihre Höchstbeschleunigung beträgt 1,2 g. In der ersten Phase legen sie die Flügel fast an; hier bildet die Übergangsregion zwischen Arm- und Handfittich sozusagen einen sekundären Flügelbug (A). Durch leichte Veränderungen dieser Konfiguration steuert der Vogel. In der Endphase sind Flügel und Beine voll an den langgestreckten Körper angelegt; der Vogel bildet nun einen einzigartigen Strömungskörper (B) sehr geringen Widerstands. Nach solchen Aufnahmen hat man Windkanalmodelle gebaut (C), die in Hochgeschwindigkeits-Kanälen näher untersucht worden sind. Bei den höchsten erreichten Reynoldszahlen (s. S. 56f.), entsprechend einer Sturzflug-Geschwindigkeit von 144 km/h, wurde ein erstaunlich geringer minimaler Stirnflächen-Widerstandsbeiwert von lediglich rund 0,08 gemessen.



Gerfalke (*Falco rusticolus*)

Tollpatschig nur außer Wasser



Südafrikanischer Brillenpinguin (*Spheniscus demersus*)

Von der Antarktis bis zum Äquator

Pinguine sind Bewohner der südlichen Hemisphäre. Der Humboldt-Pinguin (*Spheniscus humboldti*) ist z.B. entlang der Pazifik-Küsten des südlichen Südamerika verbreitet. Er gehört in die Gattung der Brillenpinguine, zu der auch der Galapagos-Pinguin (rechte Seite) gehört, der als einziger aller Pinguine nur auf den Galapagos Inseln vorkommt und damit sogar „fast die Nordhalbkugel“ besiedelt.

Flugunfähig, aber muskulös

Alle Pinguine können nicht mehr fliegen, sind allerdings mit ihrer Körperform und den verkürzten Flügeln perfekt an ein schnelles Schwimmen unter Wasser angepasst. Da sowohl beim Ab- wie beim Aufschlag Schub erzeugt wird, sind hier die An- und Aufschlagsmuskeln etwa gleich stark. Daher haben die Schulterblätter eine im Vergleich zu anderen Vögeln vergrößerte Oberfläche, an der die für den Aufschlag verantwortliche Muskulatur ansetzen kann.

