

II. Beiträge

1. Reduzierung des Strömungswiderstands bei tauchenden Vögeln

Olav Krüger, Hubert Schaller

Zusammenfassung: Um unter Wasser erfolgreich jagen zu können, müssen tauchende Vögel den *Strömungswiderstand verringern*. Das gelingt ihnen durch *physikalische Eigenschaften des Deckgefieders*, v. a. durch den *Riblet-Effekt*. Dieser verhindert eine Wirbelbildung am Vogelkörper. Ferner wird durch die enorme Vergrößerung der Oberfläche die Adhäsion so verstärkt, dass sich eine Grenzschicht bildet. Auf diese Weise wird der *Geschwindigkeitsgradient geglättet* und der *Strömungswiderstandskoeffizient gesenkt*. Auf Fotografien ist die Grenzschicht kurz nach dem Auftauchen noch sichtbar. Exemplarisch wird *bei Gänsesäger und Wasseramsel* die Spannweite dieser Effekte gezeigt: Während der Gänsesäger sich dynamisch im eher statischen Wasser bewegt, nutzt die Wasseramsel eher statisch das reißende Wasser, um an Nahrung zu kommen.

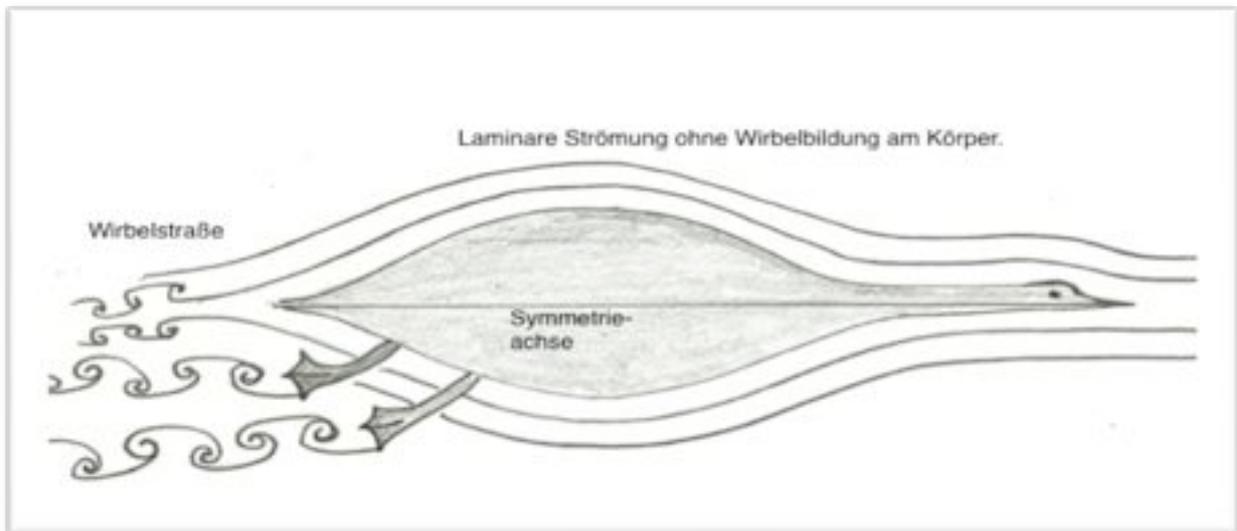
Es ist erstaunlich, dass Säugetiere und Vögel unter Wasser schnell genug sind, um Fische zu erbeuten. Eine Rolle spielen dabei die physikalischen Eigenschaften der Körperoberfläche. Das Federkleid ist wie das Fell der Seehunde und Robben elastisch.¹³ Dadurch wird die Bildung von bremsenden Wasserwirbeln verhindert. Der Strömungswiderstand entsteht hauptsächlich durch die Wirbelbildung **hinter** dem umströmten Vogelkörper, die ausgelöst wird, wenn die Strömung **am** Körper verwirbelt wird. Und genau das verhindert das elastische und feinporige Federkleid: Es ermöglicht einen laminaren Strömungsverlauf der Grenzschicht. Derselbe Effekt ist von der Haifischhaut bekannt (Riblet-Effekt) und das Fraunhofer-Institut in Bremen entwickelt auf dieser Basis eine Beschichtung für Flugzeuge.¹⁴ Eine Wirbelbildung wird auch dadurch vermindert, dass der Körper der schnellen Unterwasser-Jäger symmetrisch ist und dadurch die relativen Geschwindigkeiten der laminaren Strömungen auf allen Seiten gleich hoch ist. Die auf den Photos erkennbare Wirbelstraße entsteht hauptsächlich durch den Antrieb, der beim Gänsesäger mit den Beinen erzeugt wird. Daher ist es strömungstechnisch günstig, wenn die Beine weit hinten ansetzen. Bei noch mehr spezialisierten Fischjägern wie den Seetauchern liegen die Beine noch weiter hinten, sodass diese Arten an Land nicht mehr gehen können. Alken wie der Tordalk setzen die Flügel zum Antrieb ein und vermeiden damit noch weitgehender die Wirbelbildung hinter dem Rumpf. Die Flügel des Tordalken sind dabei im Handgelenk im rechten Winkel nach hinten gebeugt und werden zum Vortrieb mit Pronation nach unten geschlagen. Die Schwimmfüße werden bei hoher Geschwindigkeit nur zum Steuern eingesetzt.

¹³ <http://www.ebel-k.de/html/schwimmphysik.htm>

¹⁴ Wikipedia: de.wikipedia.org/wiki/Riblet



Jagender Tordalk. Photo: H. Schaller.



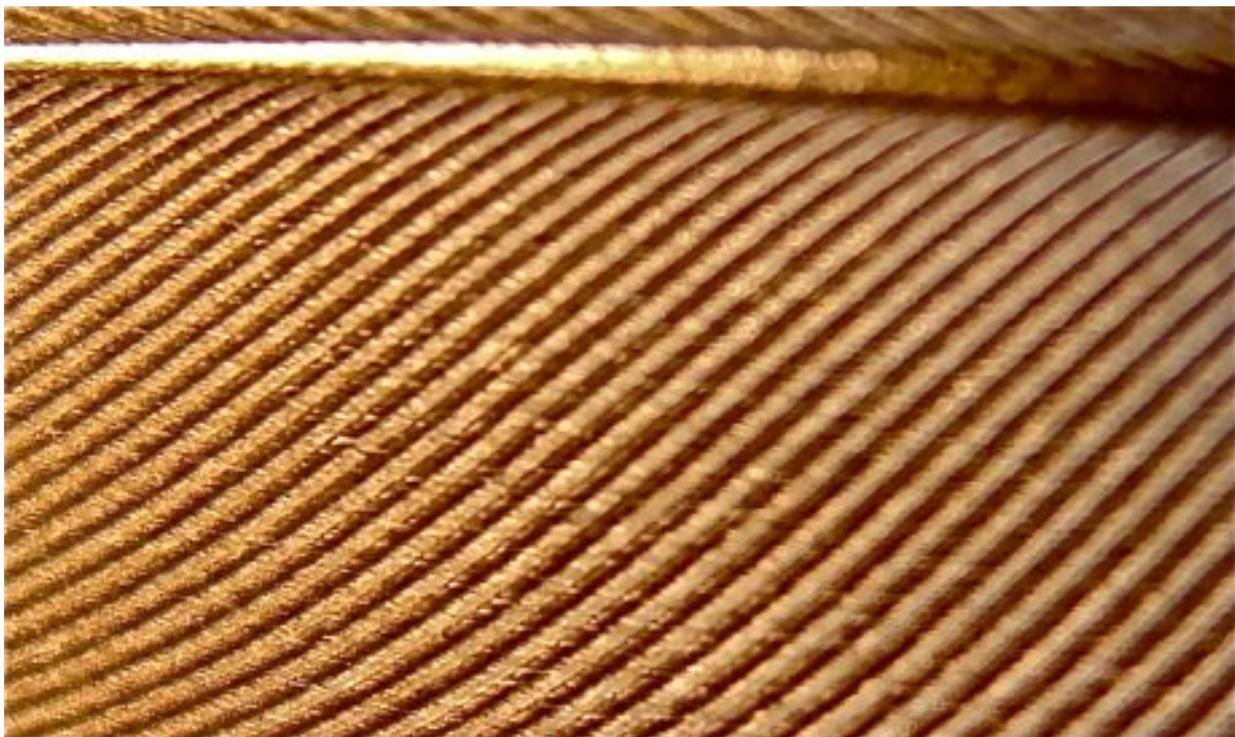
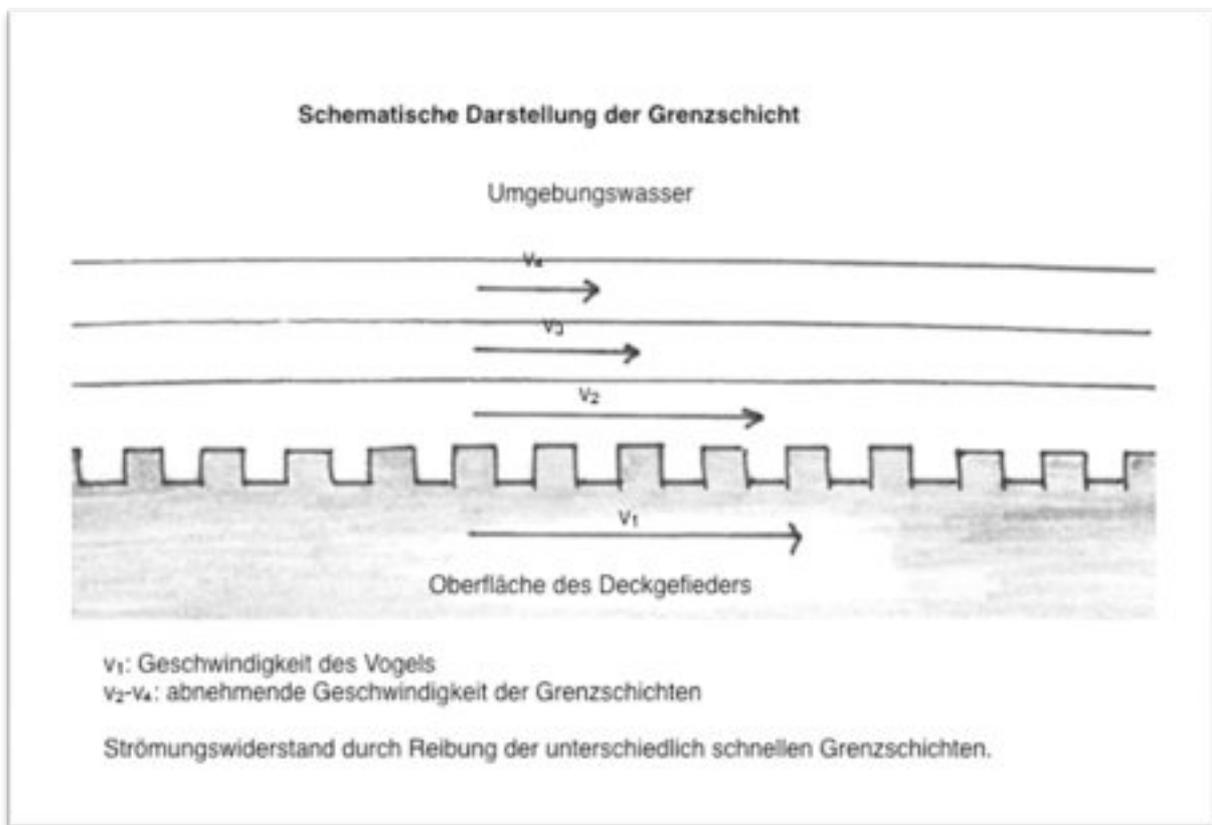
Die Wirbelstraße entsteht hauptsächlich erst durch den weit nach hinten verlegten Antrieb. Zeichnung: H. Schaller.



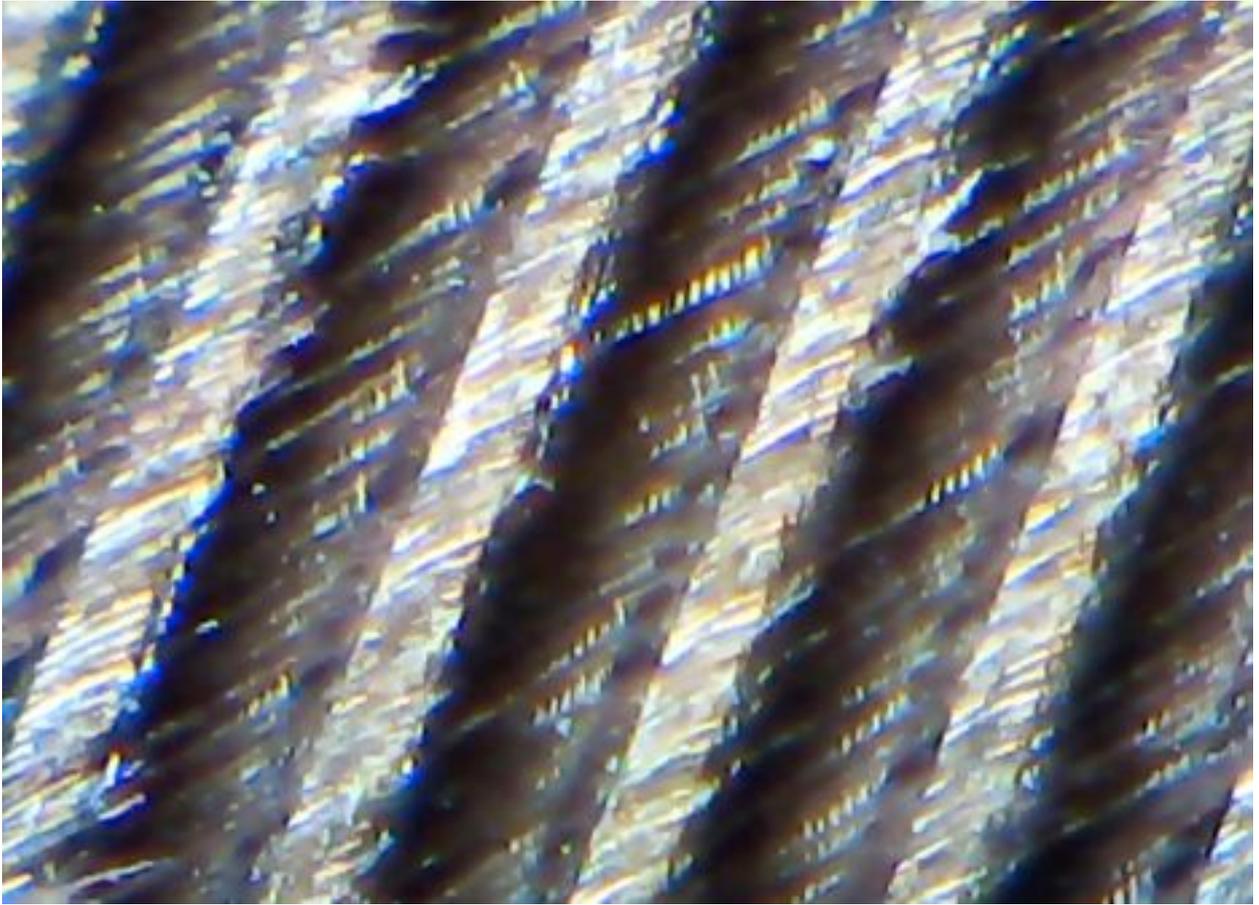
Symmetrischer, spindelförmiger Rumpf des Gänsesägers. Photo: O. Krüger.

Ferner spielt eine zweite physikalische Eigenschaft des Federkleids eine große Rolle. Die Federn sind eingefettet und dadurch wasserabstoßend. Damit wird verhindert, dass das Gefieder durchnässt wird. Aber die Textur des Federkleids ist keineswegs glatt geschlossen, sondern hat im Mikrorelief feine, aber dicht gedrängte Vertiefungen. Dadurch wird die Oberfläche enorm vergrößert, sodass sich durch Adhäsion (molekulare Anziehungskräfte) ein Wasserfilm als Grenzschicht festhängt. Diese Grenzschicht funktioniert wie ein hochflüssiges Schmiermittel zwischen Vogelkörper und Umgebungswasser und vermindert den Strömungswiderstand stark. Auch Lufteinschlüsse im Federkleid sind kurz nach dem Abtauchen hervorragende Gleitmittel und ermöglichen einen schnellen Start. Der Austausch von Lufteinschlüssen durch den Wasserfilm läuft bei den gefiederten Jägern unter Wasser allerdings sehr schnell ab, ermöglicht aber immerhin eine hohe Startgeschwindigkeit. Die Kraft, die die Bewegung des Körpers in Flüssigkeiten hemmt, heißt Strömungswiderstand. Der Strömungswiderstand eines Körpers ist umso größer, je größer die relative Strömungsgeschwindigkeit zwischen Körper und umgebendem Stoff ist und steigt im Quadrat zur Geschwindigkeit. Und gerade deshalb wirkt sich der Wasserfilm auf dem Federkleid als Grenzschicht zwischen Vogelkörper und Umgebungswasser besonders effizient aus, indem der Gradient der Strömungsgeschwindigkeit geglättet wird. Die äußere Schicht der Grenzschicht wird stets neu mitgerissen und ausgetauscht und reduziert damit den Unterschied zwischen der relativen Geschwindigkeit des Vogelkörpers und des umgebenden Wasserkörpers und damit den Strömungswiderstand.¹⁵

¹⁵ Für die kritische Durchsicht der Ausführungen zur Strömungslehre bedanken wir uns bei Prof. Erwin Lacher.



Rami (Äste) einer Deckfeder vom Mantel eines Kormorans. Photo: H. Schaller.



Mikroskopaufnahme der Rami (dunkel) mit den Radii (Strahlen) in 20facher Vergrößerung. Deckfeder eines Kormorans. Photo: H. Schaller.

Die Äste einer Deckfeder wirken wie Riblets (Rippchen) und haben die gleiche Funktion wie die Rillen in einer Haihaut.

Unter dem Mikroskop lässt sich erkennen, dass auch die Äste (Rami) und die Strahlen (Radii) einer Deckfeder eine vielfach strukturierte Oberfläche haben, sodass für die Adhäsion eine enorm große Kontaktfläche zur Verfügung steht.

Die folgenden Photos zeigen die Grenzschicht als einen Wasserfilm auf dem Gefieder, der durch die Adhäsion noch Sekunden nach dem Auftauchen anhaftet. Das ist einer der Gründe, warum der Vogel nach dem Tauchgang tiefer im Wasser liegt. Dafür gibt es allerdings einen noch wirksameren Grund: Tauchende Vögel pressen vorher höchstwahrscheinlich ihre Luftsäcke zusammen, tauchen also nach dem Ausatmen ab¹⁶ und verringern damit den Auftrieb. Der nach dem Auftauchen noch anhaftende Gleitfilm ist durch die unterschiedliche Lichtreflexion erkennbar.

¹⁶ E. Bezzel: Ornithologie. UTB 681. S. 94.



Gänsesäger bei der Jagd: Die laminare Strömung verwirbelt erst hinter dem Körper durch den Antrieb. Alle folgenden Photos - wenn nicht anders vermerkt: O. Krüger.

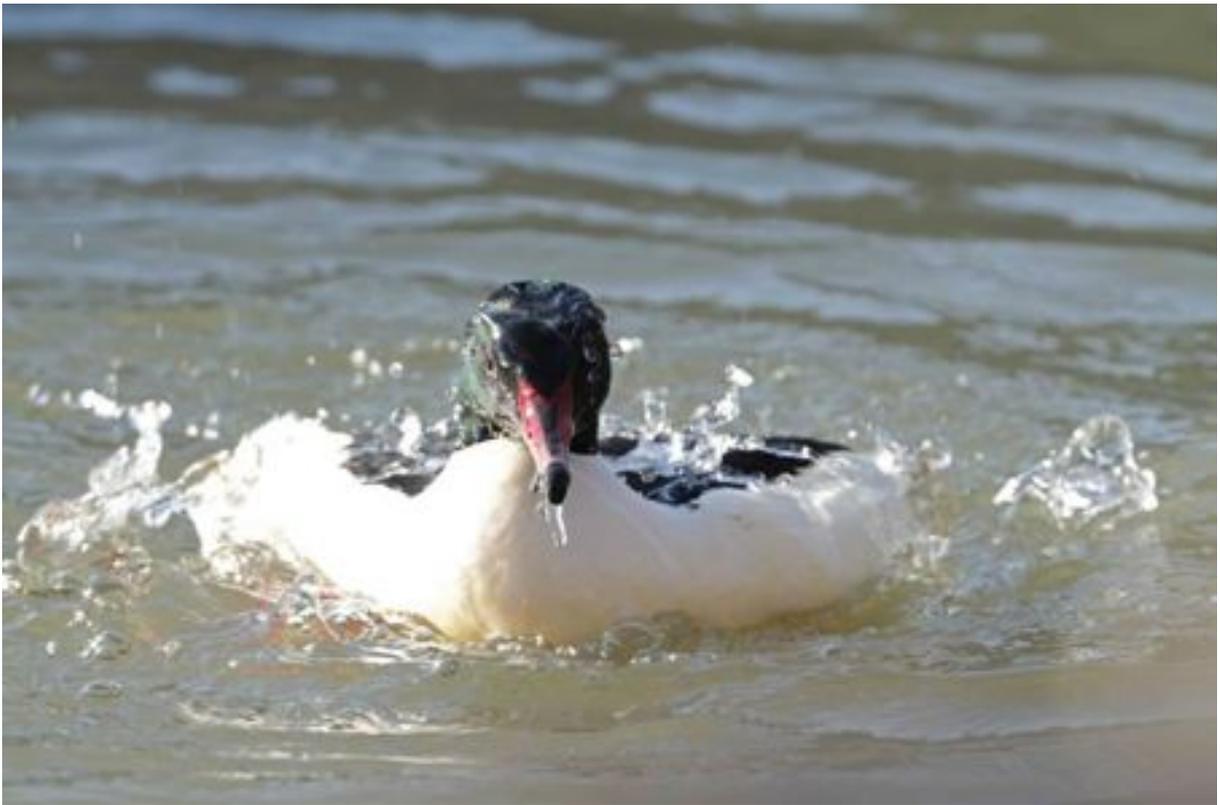




Der Wasserfilm auf dem Federkleid ist durch die Reflexion des Lichts zu erkennen.



Es dauert noch Sekunden, bis die Grenzschicht abläuft. Da der Auftrieb durch das Gewicht des Wassers abnimmt und das Volumen der Luftsäcke verringert ist, liegt der Vogel nach dem Tauchgang tief im Wasser.



Nach dem Auftauchen!



Die Grenzschicht liegt wie eine Haut auf dem Deckgefieder des Gänsesägers auch nach dem Auftauchen.





Vor dem Abtauchen – ohne Wasserfilm.



Wenn der Vogel nicht sofort wieder abtaucht, schleudert er den Wasserfilm aktiv aus seinem Deckgefieder.



Vielleicht hier weniger eine Imponiergeste, sondern die Absicht, den Wasserfilm auch aus dem Bauchgefieder loszuwerden, damit das Fluggewicht wieder optimiert wird und der Vogel fluchtbereit ist. Außerdem könnte er auch unter Wasser flüchten, was viele kleine Taucher bevorzugen.



Männliche Krickente mit Wasserfilm beim Waschen.

Wasseramseln holen einen Großteil ihrer Nahrung vom Grund schnell fließender Gewässer. Sie tauchen stets gegen die Strömung an und nutzen dabei eine Art vertikalen Fähren-effekt. Die schräg nach unten gegen die scharfe Strömung gestellten Flügel drücken den Vogel abwärts. In ruhig fließenden und stehenden Gewässern würde die Wasseramsel wegen ihres Auftriebs den Boden nicht erreichen. Sie ist also auf eine scharfe Strömung von Fließgewässern angewiesen. Daher beherbergt z. B. das Flüsschen Sinn auf seinen nicht angestauten Streckenabschnitten eine stabile Population von Wasseramseln.

Allerdings darf der Vogel auch nicht durch die Strömung von der Beute weggerissen werden. Daher muss die Gleitreibung des schnell strömenden Wassers möglichst reduziert werden. Obwohl die Wasseramsel keineswegs eine optimale Stromlinienform hat, reduziert die Trennschicht auf ihrem Gefieder als Gleitfilm den Strömungswiderstand derartig, dass die Wasseramsel auch in alpinen Sturzbächen auf dem Grund nach Köcherfliegen-, Steinfliegen-Larven u. Ä. jagen kann. Die Geschwindigkeit des Wassers, die den Fähreneffekt ermöglicht, und der Strömungswiderstand müssen in einem bestimmten, vermutlich eng umschriebenen Verhältnis stehen. Das engt die Wahl des Habitats stark ein und erklärt die Bedeutung der wenigen, noch nicht verbauten Fließgewässer für die Wasseramsel. Fehlt die Strömung, dann können Wasseramseln nur schwimmend Insekten von der Wasseroberfläche absammeln. Das lohnt sich nur in der kurzen Zeit, in der z. B. Köcher- und Steinfliegen schlüpfen.



Wasseramsel taucht gegen die Strömung ab. Sinn. 25.10.2006. Alle Photos – wenn nicht anders vermerkt: O. Krüger.



Abtauchen gegen die Strömung. Photo: V. Probst.



Der Vogel muss sich gegen die Strömung halten. Der Gleitfilm verringert den Strömungswiderstand.



Mit leicht geöffneten Flügeln lässt sich die Wasseramsel von der Strömung unter Wasser drücken.



Hebt sie Kopf und Flügelbug an, taucht sie sofort auf.



Lichtreflexion am Gleitfilm.



**Dank Adhäsion haftet die Grenzschicht auf dem Deckgefieder noch nach dem Auftauchen.
Dabei wird die Nickhaut geschlossen.**



Der Wasserfilm läuft ab. Es perlen nicht etwa einzelne Tropfen ab.



Der Wasserfilm wird aktiv abgeschüttelt, um ein günstiges Fluggewicht zu bekommen.



In Sekundenschnelle ist sie wieder flugbereit.



Adulte Wasseramsel – startbereit.

2. Supination und Pronation steuern den Vogelflug - feldornithologische Beobachtungen

H. Schaller

Einleitung: Wegen des Umfangs des heurigen Jahrbuchs wurde diese Arbeit schon früher unter [naturgucker.de: http://www.naturgucker.de/?magazin=1326797072&spk=3&spi=11008](http://www.naturgucker.de/?magazin=1326797072&spk=3&spi=11008) veröffentlicht. Der Beitrag kommentiert hauptsächlich die meisterhaften Photos der bekannten Naturphotographen O. Krüger, M. Glässel, G. Zieger. Es wird unter anderem erklärt,

welche aerodynamische Effekte das Querprofil der Flügel hat,
wie Hand- und Armflügel unterschiedlich für Auf- bzw. Vortrieb eingesetzt werden,
wie Loopings und Schrauben geflogen werden,
warum Vögel auch gegen einen Sturm von Windstärke 8 ohne Flügelschlag anfliegen können,
warum manche Vögel ohne einen Flügelschlag starten können,
warum ohne Aktivierung der Alulae kein Rüttelflug möglich ist,
warum Seeadler beim Beutefang nicht ins Wasser abstürzen, obwohl sie das Tempo stark herabsetzen müssen,
wie Winglets, geöffnete Fingerfedern und die asymmetrischen Schwungfedern den induzierten Widerstand verringern
oder dass manche Vögel komplett im Sinkflug auf alle aerodynamische Effekte verzichten,
welcher aerodynamische Effekt mit der V-Stellung der Flügel verbunden ist und die spektakulären, blitzschnellen Beutestöße der Weihen ermöglicht.

Klicken Sie den Link an oder blättern Sie im Jahrbuch weiter!

Supination und Pronation steuern den Vogelflug

Feldornithologische Beobachtungen

Das **Armskelett der Vögel** ähnelt im Prinzip dem menschlichen: Durch Verdrehung von Elle (Ulna) und Speiche (Radius) wird der Handflügel nach unten (Pronation) bzw. nach oben (Supination) gedreht. Verstärkt wird diese Verdrehung durch eine Rotation des Oberarmknochens (Humerus) in der Gelenkpfanne der Rabenbeine (Coracoide). Beim Menschen zeigen bei Pronation die Handfläche und der Daumen nach unten, bei Supination nach oben! Im Handgelenk können die Handflügel der Vögel auch nach hinten abgewinkelt werden. Durch Pro- bzw. Supination ergibt sich ein negativer bzw. positiver Anstellwinkel, da die angeströmte Vorderkante des Flügels bei Pronation nach unten, bei Supination nach oben zeigt. Gemessen wird der Anstellwinkel an der Körperlängsachse und v.a. an der Stellung des Schwanzes. Der Anstellwinkel erhöht durch den größeren Profilwiderstand auch den Luftwiderstand. „Der für den Vogel günstigste Auftrieb [beim fliegenden Vogel] wird bei Winkeln von 3 –10° erreicht“¹⁷

Da der Luftwiderstand beim startenden Vogel keine Rolle spielt, kann der Anstellwinkel beim Start groß und mit bloßem Auge gut erkennbar sein. Beim Start ist eine starke Pronation bzw. Supination im Unterarm zu erkennen, sodass der positive bzw. negative Anstellwinkel besonders deutlich erkennbar ist. Dadurch ergibt sich v. a. bei Kleinvögeln ein S-förmig geschwungener Flügelhinterrand. Für den Auftrieb sorgt der flach gehaltene Armflügel, für den Vortrieb der verdrehte Handflügel.



Startender Hausrotschwanz. Pronation des Handflügels beim Abwärtsschlag. Photo: H.Schaller.

Die startende Rohrweihe hebt die Flügel an, dabei ist die starke Supination mit dem großen positiven Anstellwinkel gut zu sehen. Um „Luft unter die Flügel zu bekommen“, springen die meisten Vögel vom Boden ab.

¹⁷ E. Bezzel: Ornithologie.UTB 1977. S. 58



Deutliche Supination beim Start der Rohrweihe. Photo: O. Krüger.

Wird der Flügel nach oben bewegt, ist auch beim **Streckenflug** eine leichte Supination zu erkennen, sodass sich ein positiver Anstellwinkel ergibt, der den mit hoher Geschwindigkeit fliegenden Schlagflügler ebenfalls anhebt, vermutlich im gleichen Maße wie der Abwärtsschlag, der dank der Pronation vorrangig den Vortrieb erzeugt. Nicht nur beim Abwärtsschlag, sondern auch beim Hochziehen der supinierten Flügel wird der Vogelkörper wegen des positiven Anstellwinkels gehoben. Das erkennt man auch an der Ausgleichsbewegung langer Hälse etwa von Gänsen, die den Kopf auf gleicher Höhe halten und daher beim Abwärtsschlag und ebenso beim Aufwärtsschlag mit dem Hals den leicht wellenförmigen Verlauf des Körperschwerpunktes ausgleichen. Supination und Pronation sind Bestandteile komplexer biomechanischer Bewegungsabläufe. Zum Profilwiderstand der Flügel kommt der induzierte Widerstand dazu, der dadurch entsteht, dass der Überdruck auf der Flügelunterseite über die seitlichen und hinteren Flügelkanten den Ausgleich sucht mit dem Unterdruck auf der Flügeloberseite.¹⁸ Damit beim Heben der Flügel der induzierte Luftwiderstand reduziert wird, lösen sich passiv durch den Luftdruck die hinteren langen und weichen Fahnen v. a. der Handschwingen und äußeren Armschwingen von den kurzen, steifen vorderen Fahnen der benachbarten Federn. Zusätzlich wird der Handflügel leicht gespreizt. Dadurch entstehen Schlitzes, so dass v.a. der Handflügel durchlässig für die Luft wird. Damit wird der induzierte Widerstand deutlich verringert.¹⁹ Das wirkt sich im Segelflug genau so aus wie bei weit klapfernden Flügelschlägen großer Segler. Der gleiche Effekt ist anzunehmen, wenn etwa Raben die Flügel kurz und schnell anheben und sich dabei die Handschwingen öffnen.

¹⁸ E. Bezzel: Ornithologie. UTB 1977. S. 57

¹⁹ W. Nachtigall, K. Büchel: Bionik. Deutsche Verlagsanstalt. Stuttgart, München. S. 76.



Weibliche Kornweihen bei Luftspielen. Photo: O. Krüger. Nicht nur die - stets offenen - fünf Fingerfedern, sondern auch die Handschwingen sind beim Aufwärtsschlag offen und durchlässig.



Blaumeise im Schwirrflug. Die Luft strömt durch die gespreizten Hand- und Armschwingen. Photo: H. Schaller.

Wenn die Handschwingen aufgefächert werden, sinkt deutlich der induzierte Widerstand. Bei vielen großen Vögeln wie den Weihen und Adlern sind die Fingerfedern stets aufgefächert - außer im schnellen Gleitflug.



Graugänse. Beim Hochziehen werden die Flügel im Handgelenk gewinkelt. Durch Supination ergibt sich ein positiver Anstellwinkel und damit Auftrieb. Zu beachten die entsprechende Ausgleichsbewegung des Halses. Photo: O. Krüger.

Für den Abwärtsschlag werden die Flügel im Handgelenk gestreckt. Das am Armflügel ausgeprägte Tragflügel-Profil des Flügelquerschnitts sorgt mit Sog auf der Oberseite und Druck auf der Unterseite für Auftrieb. Das Tragflügel-Profil des Armflügels ist körpernah am stärksten ausgeprägt, und wird bis zum Handgelenk deutlich abgeflacht. Der Handflügel ist vorrangig für den Vortrieb zuständig. Er hat zwar nur noch ein schwach ausgeprägtes aerodynamisches Profil, hat aber die größte Geschwindigkeit, so dass er auch eine Saugkraft entwickelt. Diese Saugkraft wirkt senkrecht zur Strömungsrichtung der laminaren Luftgrenzschichten. Berücksichtigt man den Strömungswiderstand, dann ergibt sich im Kräfteparallelogramm eine Luftkraft, die nach hinten oben wirkt. Aber durch die Pronation des Handflügels beim Abwärtsschlag richtet sich der Vektor der Luftkraft nach vorne, so dass ein Vortrieb erzeugt wird. Siehe auch die Graphik auf S. 20!



Ausgleichsbewegung nach dem Abwärtsschlag. Siehe auch: ausgeprägtes basales Tragflügel-Profil! Photo: O. Krüger.

Eine entscheidende Rolle spielt bei allen **extremen Flugmanövern** der gespreizte Schwanz. Er bildet den Fixpunkt für den Anstellwinkel. Das Zusammenspiel zwischen dem Anstellwinkel der Flügelvorderkante und dem gespreizten Schwanz ist besonders wichtig bei raschen Richtungswechseln während der Jagd oder der Flucht. Bei der Futterübergabe etwa der Milane, bei der Luftbalz und bei Luftkämpfen werfen sich die unteren Vögel auf den Rücken, um mit den Krallen abzuwehren bzw. bei der Balz etwa die Futterübergabe zu simulieren. Dabei sind die blitzschnellen und sekundengenau getimten Rollen um die Querachse und Längsachse nur mit extrem gespreiztem Schwanz möglich. Bei der vertikalen Rolle um die Querachse - einem Looping - werden beide Flügel synchron bewegt. Vermutlich wird der **Looping** durch beidseitige Supination eingeleitet und durch einen Abwärtsschlag durchgezogen.



Weibl. Rohrweihe zeigt einen Looping. Photos: O. Krüger.



Bei der häufiger beobachteten **Rotation** um die Längsachse arbeiten die Flügel asymmetrisch. Der breit gefächerte Stoß im Drehzentrum bildet den Fixpunkt. Daran bemisst sich der negative bzw. positive Anstellwinkel. Je nach der horizontalen Geschwindigkeit kann sich der Vogel blitzschnell in einer schraubenförmigen Bewegung auf den Rücken werfen, wenn der eine Flügel durch Pronation einen negativen, der andere durch Supination einen positiven Anstellwinkel bekommt. Dieses Manöver kostet den Vogel keine zusätzliche Kraft. Das folgende Flugbild zeigt: Der rechte Flügel wurde proniert, der linke supiniert.





Sekundenbruchteile später ist das Weibchen in Rückenlage, bereit zur Futterübernahme oder gegebenenfalls zur Abwehr eines Angreifers. Diese instabile Fluglage kann nur kurz gehalten werden. Der Vogel rollt weiter in die Normallage. Daher muss im Ernstfall die Rolle genau getimt werden. Kolkraben²⁰ oder Raufußbussarde greifen gerne paarweise staffelförmig an und zwingen den Eindringling, mehrmals schnell hintereinander zu rollen und dabei gefährlich an Flughöhe zu verlieren. Habichte und Sperber fliegen rasant durch

²⁰ Siehe OAG-Jahresbericht 2011 S. 91.

schmale Durchlässe, indem sie mit asynchroner Steuerung der Handflügel exakt um 90° um die Längsachse rollen.

Zum Profilwiderstand des Flügels kommt der **induzierte Widerstand** dazu. Die dabei entstehenden kräftezehrenden Wirbel werden durch lange und spitze Handflügel vermutlich verringert, u. a. gerade deshalb, weil sie nur ein schwach ausgeprägtes Tragflügelprofil haben.



Lachmöwe mit proniertem Handflügel beim Abwärtsschlag. Photo: H. Schaller.

Bei der **Landung** werden die Flügel supiniert, die Handflügel auch bei den Möwen aufgefächert und die langen Schirmfedern wie Landeklappen eines Flugzeugs nach unten gedrückt. Auf diese Weise wird der Luftwiderstand so weit vergrößert und der Auftrieb verringert, dass eine Punktlandung möglich ist.



Supination bei der Landung. Großer positiver Anstellwinkel der Schirmfedern. Photo: H. Schaller.

Beim **Rüttelflug** von Turmfalken, Mäusebussarden, Raufußbussarden, Seeschwalben, Feldlerchen oder Fischadlern u. a. werden die Handflügel nicht proniert, sondern auch im Abwärtsschlag so weit supiniert, dass in Zusammenarbeit mit dem weit gespreizten Schwanz kein Vortrieb bewirkt wird. Wie groß der positive Anstellwinkel dabei sein muss, um auf gleicher Höhe zu bleiben, hängt auch von der Stärke des Gegenwinds ab. Grundsätzlich rütteln die Vögel gegen den Wind und an Land am liebsten im Aufwind, wo sie kurzfristig auch auf den Flügelschlag verzichten können und dann ihre Position nur mit Pronation, Supination und dem Schwanz energiesparend aussteuern.



Rüttelnder Turmfalke. Starke Supination auch beim Abwärtsschlag. Photo: M. Gläbel.

Dabei werden auch die Daumenfittiche, auch Alula (Nebenflügel, wörtlich „Flügelchen“) genannt, weit abgespreizt. „Der Daumenfittich hat die Aufgabe, die Luftströmung über dem Flügel auch bei steilem Anstellwinkel nicht abreißen zu lassen, sodass der Auftrieb erhalten bleibt.“²¹ Bei einem zu großen, sog. kritischen positiven Anstellwinkel kann die lineare Luftströmung auf der Oberseite des Flügels abreißen und verwirbeln. Dann erlischt die Saugkraft und erhöht sich der Strömungswiderstand so, dass der Vogel abstürzen würde. Um dies zu verhindern, wird der Daumenfittich abgespreizt. Dann strömt die Luft beschleunigt durch den Spalt zwischen Alula und Flügel und sorgt für eine glatte Luftströmung.²² Der linke Flügel der oben gezeigten Aufnahme zeigt den Spalt zwischen Alula und Handflügel.

²¹ Aus Wikipedia: Alula.

²² Nach: S. Klautke, K. Köhler, N. Krischke: Der Flug der Vögel. UB 178/16. Jahrg./Okt. 1992. S. 49



Turmfalke ohne Flügelschlag im Aufwind stehend. Photo: O. Krüger.

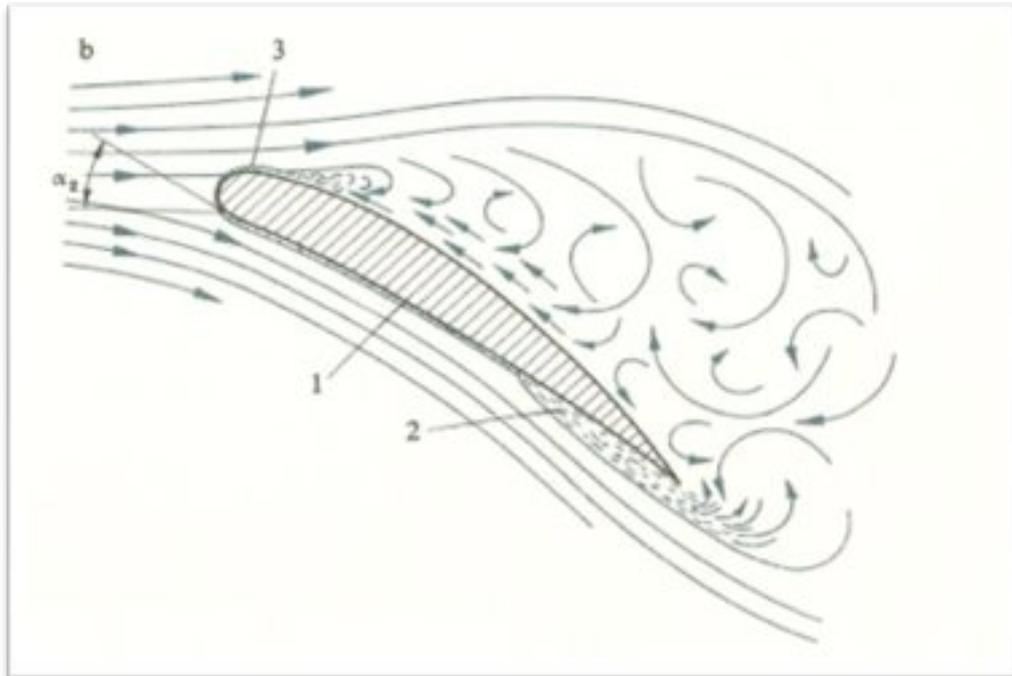


Feldlerche beim Rüttelflug. Photo: M. Gläbel.

Der Anstellwinkel der Lerche beim Rüttelflug scheint noch etwas größer zu sein als beim Turmfalken und beträgt wie bei diesem deutlich über 10° . Auch bei der Lerche sind die

Handschwinge geöffnet und verhindern, dass die Luftströmung zu stark verwirbelt. Die Daumenfittiche sind nicht abgespreizt.

Schematische Darstellung der Turbulenzen bei einem zu hohen Anstellwinkel (α 2 größer als 10°):



**Graphik
entnommen
aus K.
Wunderlich,
W. Gloede:
Natur als
Konstrukteur.
S. 91.**

Die laminare Grenzschicht (1) löst sich bei einem kritischen Anstellwinkel (α 2) vom Flügelhinterrand her nach vorne bis zu Punkt 2 bzw. 3 vom Flügel ab und verwirbelt.²³ Dadurch geht die Saugkraft auf Null und der Profilwiderstand erhöht sich. Um dies beim Rütteln zu verhindern oder beim Landen zu verzögern, wird der **Daumenfittich (Alula)** abgespreizt. Ferner werden die Flügelspitzen gespreizt und für die Luftströmung von unten nach oben durchlässig. Dadurch wird die Strömung auf der Flügeloberseite mehr oder weniger geglättet.

²³ Nach: K. Wunderlich, W. Gloede: Natur als Konstrukteur. Edition Leipzig, 1977. S. 91.

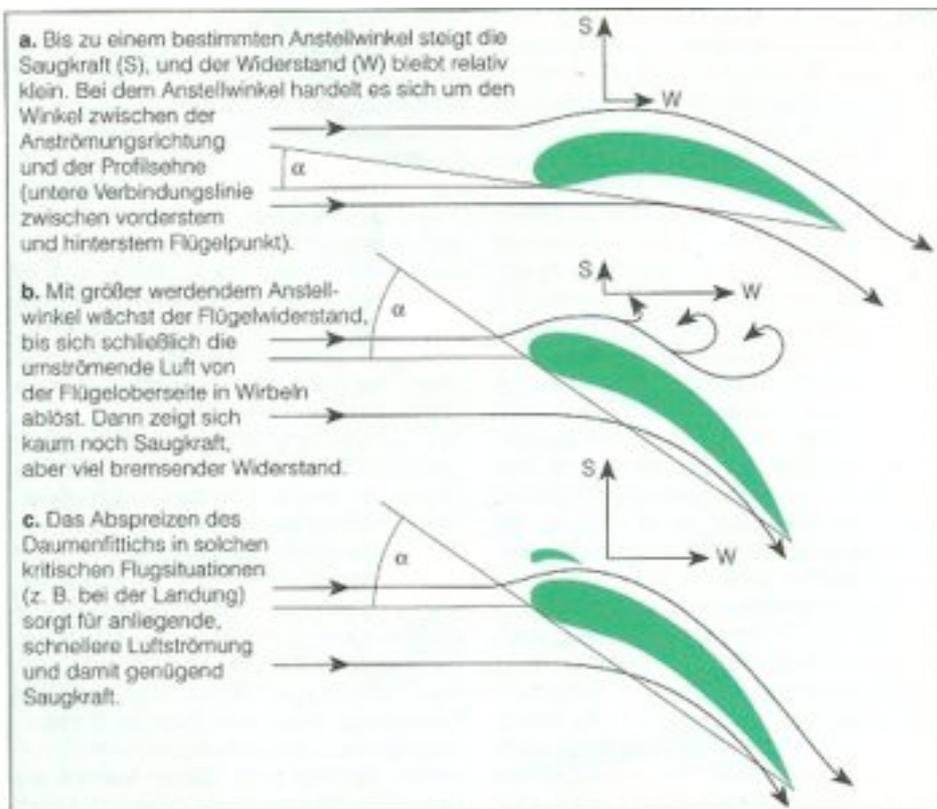


Abb. 4: Schema der Kräfteentstehung am Vogelflügel bei unterschiedlichen aerodynamischen Anstellwinkeln

Graphik aus S. Klautke, K. Köhler, N. Krischke: Der Flug der Vögel. UB 178/16. Jahrg./Okt. 1992. S. 49.



Weibl. Turmfalke beim Rütteln. Photos: M. Gläbel.



Turmfalke mit präziser Punktlandung beim Beutefang. Offene Handflügel. Photo: O. Krüger.

Auch bei der Landung werden die über den kritischen Anstellwinkel hinaus supinierten Handflügeln weitgehend luftdurchlässig gemacht, vermutlich deshalb, weil damit die Bildung unerwünschter Luftwirbel so lange verzögert wird²⁴, bis sich der Falke punktgenau auf die Beute fallen lässt.

Der Seeadler vollführt beim Fischfang ein ähnliches Bremsmanöver, darf aber nicht ins Wasser fallen, sondern muss nach dem Zugriff durchstarten. Er darf also die laminare Luftströmung trotz des großen Anstellwinkels und der reduzierten Geschwindigkeit nicht völlig abreißen lassen, sondern muss ausreichend Auftrieb erhalten. Das bewirken die großen, abgespreizten Daumenfittiche und die nach oben gebogenen Fingerfedern.

²⁴ Nach: W. Nachtigall, K. Büchel: Bionik. Deutsche Verlagsanstalt. Stuttgart, München.



Seeadler vor dem Zugriff in der Bremsphase mit großem positivem Anstellwinkel und abgespreizten Alulae. Photo oben und unten: G. Zieger.



In der Beschleunigungsphase wird der Anstellwinkel normalisiert! Die Turbulenzen saugen die Mantelfedern unterschiedlich hoch, mit von hinten nach vorne sinkender Kraft, weil die Turbulenzen vom Flügelhinterrand ausgehen und zur Vorderkante hin zusehends unterdrückt werden. Kleinere Turbulenzen wellen die hintere, elastische Fahne der Fingerfedern, verhindern aber größere, bremsende Turbulenzen auf der Flügeloberseite und reduzieren zusätzlich den induzierten Widerstand. Zu sehen ist die aktivierte Alula am linken Flügel.

Im reißenden **Streckenflug** der Falken werden die Handflügel beim Aufwärtsschlag nach hinten gewinkelt und die Hebellänge annähernd halbiert. Damit wird der Kraftansatz günstiger für die weniger stark entwickelten Kleinen Brustmuskel (*M. pectoralis minor*), die den Aufwärtsschlag bewerkstelligen. Das folgende Photo zeigt den Beginn des Abwärtsschlags nach erfolgter Pronation.



Turmfalke im Streckenflug beim Hochziehen der Flügel. Der Profilwiderstand wird mit aerodynamischer Position der Beute nicht wesentlich erhöht. Photo: M. Gläsel.

Flug unter Wasser: Unter Wasser müssen Alken wie der unten abgebildete Tordalk gegen einen wesentlich höheren Widerstand ankämpfen. Daher wird der spitze Armflügel auch im Abwärtsschlag im Handgelenk nach hinten gewinkelt und beim Abwärtsschlag proniert. Mit halbiertes Länge des Hebelarms ist der Kraftansatz günstiger. Es ist anzunehmen, dass es der im Vergleich zur Luft größere Strömungswiderstand im Wasser nötig macht, den Anstellwinkel des Handflügels im Bereich von 3° bis 10° nach unten zu verschieben. Aber auch im Wasser wird die Stärke der Pronation bzw. Supination davon abhängen, ob der Vogel aus niedriger Geschwindigkeit beschleunigt oder sich schon mit maximaler Geschwindigkeit bewegt. Im letzteren Fall muss sich der Anstellwinkel im unteren Bereich bewegen, um den Profilwiderstand in einem günstigen Bereich zu halten. Da der tauchende Vogel keine Kraft für den Auftrieb benötigt, sondern eher dagegen ankämpfen muss, wird v. a. der positive Anstellwinkel, also die Supination, nur für die rasante Verfolgung der Beute nach oben genutzt. Den Scheitelpunkt des Winkels bilden im Wasser – wie bei allen schnellen Tauchern - die weit hinter dem Körperschwerpunkt angesetzten Schwimfüße.



Jagender Tordalk. Photo: H. Schaller.

Arten mit langen, spitzen Flügeln nutzen zum **Start** gerne starken Gegenwind. Von einer Hügelkuppe herab können sie auch den Aufwind nutzen, indem sie sich zunächst mit einem positiven Anstellwinkel hochheben lassen um dann mit einem negativen Anstellwinkel nach vorne gegen den Wind zu fliegen und zwar ohne Flügelschlag – nur mit einem fein abgestimmten Spiel von Supination und Pronation der Armflügel auch aus dem Schultergelenk heraus.

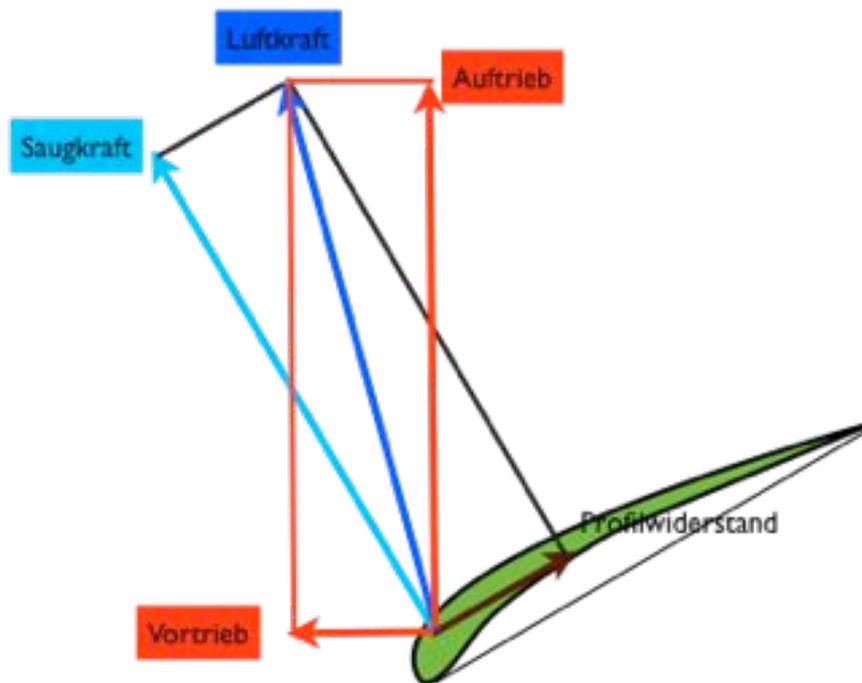


Schmarotzerraubmöwe lässt sich mit supinierten Flügeln vom Wind heben. Photo: H. Schaller.



Anschließend wird der gesamte Flügel im Schultergelenk proniert und der Schwanz gefächert. Der negative Anstellwinkel sorgt für Vortrieb gegen den Aufwind. Photo: H. Schaller.

Die folgende Graphik stellt schematisch die aerodynamischen Kräfte dar: Der Profilwiderstand wirkt parallel zur Sehne zwischen Flügelbug und Flügelhinterrand. Senkrecht dazu wirkt die Saugkraft als Summe von Sog und Druck. Aus dem Kräfteparallelogramm von Saugkraft und Strömungswiderstand resultiert die Luftkraft. Zerlegt man diese in zwei Kraftkomponenten, dann ergeben sich Auftrieb und Vortrieb. Der Vogel fliegt gegen den Wind ohne Flügelschlag. Das funktioniert umso besser, wenn lange und spitze Flügel einen sehr geringen Widerstand bieten und die Geschwindigkeit der Luft sehr hoch ist. Denn die Saugkraft wächst im Quadrat zur Windgeschwindigkeit.



Graphik nach: S. Klautke, K. Köhler, N. Kruschke: Der Flug der Vögel. UB 178/16. Jahrg./Okt. 1992. S. 49.

Dieses System kann so ausgereizt werden, dass manche Vögel wie Eissturmvögel nur bei Starkwind fliegen können und bei Schwachwind landen müssen.

Im Prinzip veranschaulicht diese Graphik auch, wie beim Abwärtsschlag des stark pronierten Handflügels beim normalen Flug der Vortrieb entsteht.²⁵

Wenn Vögel **gegen Starkwind anfliegen**, dann brauchen sie wenig Muskelkraft, weil die Saugkraft im Quadrat zur Windgeschwindigkeit ansteigt. Ein Mensch kann sich bei dieser Windstärke nur noch mühsam vorwärts bewegen. Problemlos fliegen die Seevögel gegen den Sturm: Durch entsprechende Pronation wird die Luftkraft nach vorne gekippt und erzeugt einen erstaunlichen Vortrieb. Je nachdem wie strömungsgünstig der Vogelkörper ist, bleibt auch nach Abzug des Profilwiderstands genug Vortrieb übrig. Um den Profilwiderstand bei steigender relativer Geschwindigkeit zu reduzieren, werden die Handflügel beim reinen Gleitflug und beim Aufwärtsschlag nach hinten abgewinkelt. Es konnte beobachtet werden, dass Kolkkraben, Dreizehenmöwen und Basstölpel bei Windstärke 8 problemlos gegen den erheblichen Winddruck – er steigt im Quadrat zur Windgeschwindigkeit – anfliegen konnten. Dabei kamen die Kolkkraben und Dreizehenmöwen ohne einen einzigen Flügelschlag aus, wobei die Handflügel der Kolkkraben vollkommen nach hinten abgewinkelt waren. Kolkkraben und Dreizehenmöwen nutzten die Wirbel hinter den Klippen und kippeten dabei blitzschnell um die Längsachse, vermutlich um die Turbulenzen abzufangen. Die Basstölpel haben einen viel geringeren c_w -Wert. Sie schlugen lässig mit den Flügeln und knickten nur beim Hochziehen der Flügel den Handflügel nach hinten ab.

²⁵ Die Saugkraft setzt genau genommen im rechten Winkel zu den linearen Grenzschichten der Luftströmung an. Die Bogensehne ist dafür ein grober Näherungswert.



Dreizehenmöwe ohne Flügelschlag gegen leichten Sturm mit Windstärke 8.



Immaturer Basstölpel fliegt gegen den Wind bei Windstärke 8 auf der Beaufortscala.

Der niedrige c_w -Wert des Basstölpels erlaubt dieser Vogelart, ungerührt gegen den **Starkwind** anzufliegen. Der Schwanz ist lang und zugespitzt und hinterlässt kaum eine bremsende Wirbelschlepp²⁶. Außerdem deltet sich die auffallend elastische Körperoberfläche schon durch kleine Windwirbel ein. Dieser Effekt wird ermöglicht durch ein dickes Dunenkleid und Luftsäcke unter der Haut. Dadurch werden Luftturbulenzen schon im Entstehen „geschluckt“ und größere Wirbel verhindert. Die Luft-Grenzschichten können laminar am Körper vorbeiströmen. Dieser Effekt ist im Wasser besonders wichtig, damit beim Stoßtauchen die Wasser-Grenzschicht den Körper laminar umströmt und nicht verwirbelt. Außerdem muss der Basstöpel den Aufschlag auf dem Wasser dämpfen, wenn er mit ca. 100 km/h (Zitiert aus Wikipedia) ins Wasser stößt.



Dellen im Deckgefieder eines Basstölpels beim Flug gegen Starkwind. Photo: H. Schaller.

Bei exakt gleichen Windverhältnissen entdeckt man im Gefieder einer Silbermöwe, die nur oberflächlich ins Wasser eintaucht, keine ähnlichen Dellen.

²⁶ Der Nachteil dieser Schwanzform: Der Basstöpel ist an Wendigkeit seinem ärgsten Schmarotzer, der Skua, klar unterlegen und kann sich oft nur kurzzeitig unter Wasser flüchten.



Silbermöwe fliegt gegen den Wind bei Windstärke 8. Keine Dellen im Gefieder! Photo: H. Schaller.

Wenn man die Vielfalt an Flugmanövern betrachtet, verwundert es kaum, dass manche Vögel gelegentlich alle üblichen aerodynamischen Effekte außer Kraft setzen. Vögel wie Dorngrasmücke, Feldlerche und Baumpieper zeigen beim **Singflug** auch einen steilen **Sinkflug**, der derartig wenig Vortrieb hat, dass die Fluggeschwindigkeit nicht ausreicht, um eine laminare Strömung an den Flügeln und damit Auftrieb zu ermöglichen. Denn bei zu niedriger Geschwindigkeit wird die Luft turbulent verwirbelt, v. a. auf der Oberseite. Der Vogel bemüht sich auch nicht, durch Ausklappen der Alulae die Turbulenzen auf der Oberseite zu glätten. Der Flug ähnelt dadurch dem Sinken eines Fallschirms. Weitgehend nur der hohe Strömungswiderstand in der Vertikalen bremst den freien Fall. Der unten gezeigte Baumpieper beendet diese absichtlich scheinbar unkontrollierte Flugphase vermutlich, indem er die Flügel proniert, damit einen steilen Gleitflug einleitet und dadurch Tempo aufnimmt. Die Luftwirbel glätten sich, die Luftströmung wird laminar, der Auftrieb stellt sich wieder ein und mit einigen Flügelschlägen erreicht der Vogel wieder seinen Landeplatz.

Die Feldlerche zeigt den Singflug am häufigsten und hat die Sinkphase perfektioniert. Die konkave Flügelhaltung erzeugt einen Fallschirm-Effekt. Am Ende der Sinkphase geht die Lerche in einen steilen Gleitflug über, legt dabei oft die Flügel völlig an und beschleunigt, sodass die Strömung wieder laminar wird. Knapp über der Vegetation bremst sie flatternd ab, der Auftrieb geht gegen Null und die Lerche fällt wie ein Stein in die Pflanzendecke – wohlweislich in irritierender Entfernung vom Nest.



Baumpieper in der Sinkphase des Singflugs. Photo: H. Schaller.



Feldlerche im Sinkflug. Photo: M. Gläsel.

Es ist ein erstaunliches Phänomen des antriebslosen **Gleitflugs**²⁷, dass gute Segler wie Adler und Möwen gegen eine steife Brise fliegen, und zwar ohne einen einzigen Flügelschlag. Als einzige Energiequelle wird die Schwerkraft genutzt. Der Gleitwinkel hängt auch vom Anstellwinkel ab und dieser kann mit Hilfe der Pronation verändert werden, je nachdem, ob der segelnde Vogel steil nach unten beschleunigen will oder – bei geringerer Pronation im Aufwind „stehen“ will. Der Energieaufwand ist minimal im Vergleich zu einem Flug gegen den Wind mit weit ausholenden Flügelschlägen. Beim Segeln im scharfen und turbulenten Wind wird der Anstellwinkel häufig verändert; dabei fächert die Schmarotzerraubmöwe den Schwanz weit auf.

²⁷ Der *Gleitwinkel* γ gibt den **Winkel** an, unter dem ein Flugzeug im antriebsfreien Zustand (*Gleitflug*) gegen die Horizontale nach unten gleitet. Dies ist ein Kennwert des **Flügelprofils**. Der **Tangens** dieses Gleitwinkels ist die *Gleitzahl* ϵ .

Das *Gleitverhältnis* E ist der Kehrwert der Gleitzahl. Das Gleitverhältnis gibt an, wie viele Meter ein Flugzeug in stiller Luft in waagerechter/horizontaler Richtung gleitet, während es einen Meter **Flughöhe** verliert. (Wikipedia)



Normale Spreizung des Schwanzes der Schmarotzerraubmöwe.



Der Schwanz wird aufgefächert, wenn der Anstellwinkel verändert wird. Photos: S. schaller.

Wenn Gänse eine weite **Kurve** aktiv fliegen, dann pronieren sie vermutlich den bogeninneren Flügel stärker als den bogenäußeren und erzeugen damit die Kurvenlage. Eine

Steuerung mit asynchron ausgeklappten Alulae ist nicht erkennbar. Bei Staren allerdings wurde dieser Einsatz der Alulae im Windkanal beobachtet.²⁸



Kanadagänse. Bogeninnerer Flügel stärker proniert. Photo: M. Gläbel.

²⁸ W. Nachtigall, K. Büchel: Bionik. Deutsche Verlagsanstalt. Stuttgart, München. S. 73.



Segelnder Rotmilan. Bogeninnerer Flügel stärker proniert. Siehe Beleuchtung!

Im **Segelflug** kann mithilfe asynchron gesteuerter Daumenfittiche eine eher behäbige Kurve geflogen werden. Blitzschnelle Wendungen von „Hochleistungsfliegern“ wie der Milane werden ohne Alula gesteuert. Vielmehr wird der bogeninnere Flügel stärker proniert, bekommt dadurch einen negativen Anstellwinkel, während der bogenäußere Flügel mehr oder weniger supiniert wird und damit einen positiven Anstellwinkel bekommt. Damit der Körper nun keine Schraube beschreibt, sondern um die vertikale Achse giert, steuert der Schwanz die Kurve aus, in seiner Wirkung vergleichbar mit dem Seitenruder eines Flugzeugs. Um die Wirkung eines Seitenruders zu bekommen, wird die bogenäußere Kante des Stoßes hochgedreht. Da der bogenäußere Flügel in einer kurvenförmigen Bahn bei einer Flügelspannweite des Rotmilans von ca. 162 cm (nach Th. Mebs) schneller als der bogeninnere Flügel ist, erzeugt er mehr Vortrieb. Beide Milanarten fallen im Flug damit auf, dass sie den Schwanz häufig und sehr deutlich um die Längsachse drehen und die Flügel häufig asynchron steuern.

Vor allem bei großen Vögeln sind die Handschwingen im Segelflug aufgefächert und biegen sich nach oben. Die aerodynamischen Vorteile dieser Flügelspitzen wurden schon früh als Vorbild für den Flugzeugbau erkannt und „1897 von [Frederick W. Lanchester](#) zum Patent angemeldet“²⁹ und sind heute als Winglets – aufgebogene Flügelspitzen - bei Passagiermaschinen Standard und entsprechend gut erforscht. Die aerodynamische Wirkung der Winglets lässt sich also auch für die Flügel der guten Segler unter den Vögeln übertragen:

*„Winglets erhöhen die **Streckung** einer **Tragfläche**, ohne die Spannweite zu vergrößern. Dies bringt (---): bessere Stabilität um die Hochachse und weniger induzierten Widerstand bei hohen Auftriebswerten, hohen Anstellwinkeln (niedrigen Geschwindigkeiten). Nachteilig wirkt sich aus: mehr Widerstand bei hohen Geschwindigkeiten.*

*An der Tragflügelhinterkante bilden sich **Wirbel**, aus denen im Flügelaußenbereich **Wirbelschleppen** entstehen. Die Luft strömt von der Unterseite der Tragflächen, wo Überdruck vorliegt, um die Tragflächenenden herum nach oben, wo Unterdruck herrscht. Die Wirbel sind bei positiver **Tragflächenpfeilung** an der Flügelspitze am stärksten und rollen sich (je nach Flugzustand) zu einem Randwirbel auf. Die Wirbel induzieren am Ort des Flügels eine abwärtsgerichtete Kraft, wodurch ein **induzierter Luftwiderstand** entsteht. Winglets reduzieren nun den Einfluss dieser Wirbel, indem sie den Randwirbel zerteilen (ein Teil geht am Flügel-Winglet-Übergang ab, ein Teil an der Wingletspitze) und durch ihre Profilgebung nach außen ablenken. Die Gesamtstärke der Wirbel bleibt dabei gleich.*

*Zusätzlich senken Winglets die **Abrissgeschwindigkeitsgrenze**, also die Geschwindigkeit, die mindestens vorhanden sein muss, um einen für das Flugzeug nutzbaren Auftrieb an der Tragfläche zu erzeugen“³⁰.*

Vögel, die ein großes Revier abdecken müssen wie Beutegreifer und Geier oder schwere Zugvögel müssen kraftsparend und langsam fliegen können, ohne dass die laminare Strömung abreißt. Das Letzere verhindern die relativ großen Daumenfittiche und die aufgefächerten und hochgebogenen Handschwingen, auch Fingerfedern genannt. Da die „Vogel-Winglets“ den Profilwiderstand im Quadrat zur Geschwindigkeit erhöhen, wirken sie sich beim schnellen Gleitflug kontraproduktiv aus. Daher werden beim Dahinschießen die Daumenfittiche angelegt und die Handschwingen nach hinten abgewinkelt und dabei geschlossen.

Zum folgenden Photo: Auf eine asynchrone Pronierung kann der Seeadler in dieser Flugkurve schon verzichten, weil der Außenflügel nur dank höherer Geschwindigkeit schon mehr Auftrieb hat als der bogeninnere Flügel.

²⁹ Wikipedia: Stichwort „Winglet“.

³⁰ Ebda unter „Winglet“.



Juveniler Seeadler. Die großen Alulae sind aktiviert. Photo: H. Schaller.



Seeadler mit angelegten Alulae. Photo: Gunther Zieger.

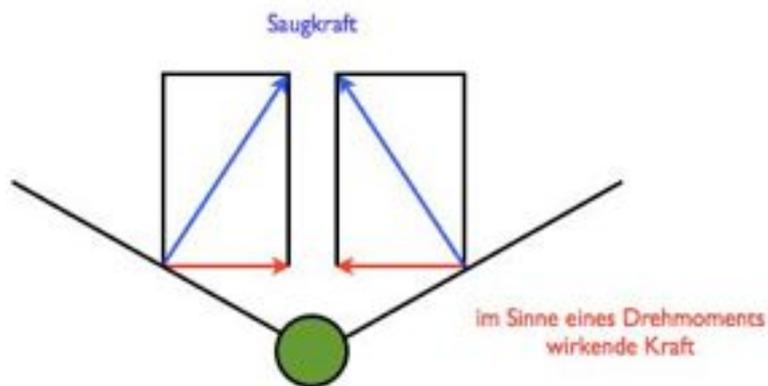


Seeadler mit aktivierten Alulae in kritischer Schräglage. Die Randwirbel wellen die hinteren Fahnen der Fingerfedern. Photo: G. Zieger.

Vielleicht werden diese Randwirbel durch eine dauerhafte Wellung der Handschwingen verursacht. Das lassen jedenfalls entsprechend geformte Mauserfedern vermuten. Bei einer derartigen Schräglage darf die lineare Strömung nicht abreißen, sonst würde der „Flieger

abschmieren“. Die Daumenfittiche verhindern den Strömungsabriss und die „Winglets“ stabilisieren den Körper um die Vertikalachse.

Der gaukelnde **Flug der Weihen** hängt mit der bevorzugten V-Stellung der Flügel zusammen. Die Saugkraft, die senkrecht zu der laminaren Luftströmung am Flügel steht, wirkt dabei schräg nach oben. Die waagrecht zur Körpermitte zeigenden Kraftvektoren heben sich gegenseitig auf, so lange die Flügel synchron im gleichen Winkel gehalten werden. Sie drehen den Körper aber blitzschnell um die Längsachse, sobald einer der waagrecht Kraftvektoren wegfällt oder schwächer wird. Das geschieht, wenn etwa der Anstellwinkel bei einem der Flügel negativ wird. Eine winzige asynchrone Änderung des Anstellwinkels genügt, um den Körper zu kippen.



Zeichnung: H. Schaller.



**Männliche
Wiesenweihe
beim Segelflug
mit typischer
Flügelstellung.**

**Photo: G.
Zieger.**

Der Mittelwert aller Auftriebskräfte am Flügel setzt im Schwerpunkt des Flügels an. Je weiter der Schwerpunkt des Flügels vom Schwerpunkt des Rumpfes entfernt ist, desto effizienter wirken sich die tangentialen Kräfte aus, weil der Radius länger ist. Tatsächlich haben Weihen im Vergleich zum Körper lange, gleichbleibend breite Flügel, deren Schwerpunkt relativ weiter vom Körper entfernt ist, als es etwa bei Tauben oder Falken der Fall ist. Das zeigen folgende Vergleichswerte von Gewicht zu Flügellänge bei zwei geschickten Seglern: Das maximale Gewicht einer Wiesenweihe (370 g) durch die maximale Spannweite (130 cm) ergibt einen Wert von 2,67, der Mäusebussard mit max. 1200 g Körpergewicht und einer max. Flügelspannweite von 138 cm ³¹ hat einen Vergleichswert von 8,69. Bei dem geringen Gewicht im Vergleich zur Flügellänge kann die Weihe auf den vollen Auftrieb waagrecht gehaltener Flügel verzichten. Es reicht ihr der reduzierte Auftrieb der schräg gehaltenen Flügel.



Weibliche Wiesenweihe. Der Schwerpunkt der langen Flügel dürfte nicht weit vom Handgelenk entfernt sein. Photo: M. Gläbel.

³¹ Größenangaben nach Th. Mebs: Greifvögel Europas. 4. Auflage, 2012.

Ist der Körper erst einmal in der Schräglage des Kurvenflugs, hält die Weihe die Flügel durchaus waagrecht .



Wiesenweihe im Kurvenflug mit waagrecht gehaltenen Flügeln. Photo: H. Schaller.

Der spektakuläre Jagdstoß der Weihen kann folgendermaßen erklärt werden: Die Weihe braucht nur einen der Flügel stärker pronieren, der Anstellwinkel wird negativ und der tangential wirkende Kraftvektor am anderen Flügel dreht den Körper blitzschnell, sodass der Vogel über den pronierten Flügel abkippt. Die folgenden Photos zeigen, dass der rechte Flügel deutlich proniert wird. Das zeigt die unterschiedliche Beleuchtung der Flügelunterseite. Der rechte Flügel kippt ab, während am linken Flügel die Saugkraft weiterhin ein starkes Drehmoment entwickelt. Die Effizienz dieses aerodynamischen Vorgangs wird erhöht, indem der pronierte Flügel gestreckt, der bogenäußere Flügel gewinkelt wird. Dadurch wird der Drehpunkt in den gestreckten Flügel verlagert.



Jagdstoß einer Wiesenweihe. Sie kippt über den gestreckten Flügel ab. Photos: O. Krüger.



Eine juvenile Steppenweihe vollführt beim Jagdstoß einen Looping mit halber Schraube um den gestreckten linken Flügel. Photo: H. Schaller.

Zusammenfassung: Der Vogelflug ist ein komplexes und sehr variables biomechanisches System, in dem Pronation und Supination eine große Rolle spielen. Pronation und Supination erzeugen einen negativen bzw. positiven Anstellwinkel der Flügel. Der Anstellwinkel bemisst sich nach einem Winkelschenkel, der von der Körperlängsachse und besonders vom Schwanz bestimmt wird. Ein fein abgestimmtes Zusammenspiel zwischen Pro- und Supination einerseits und dem bei Bedarf entsprechend weit gespreizten Schwanz erlaubt kraftsparende Flugmanöver. Sowohl das Tragflügelprofil hauptsächlich des Armflügels und der Abwärtsschlag sorgen für Auftrieb in der Luft, als auch der positive Anstellwinkel beim Heben der Flügel. Um den Auftrieb beim Heben der Flügel nicht zu verringern und um induzierten Widerstand zu verringern, lösen sich die weichen hinteren Fahnen der Schwungfedern von den steifen vorderen Fahnen der benachbarten Federn und geben Schlitze frei, durch die Luft von oben nach unten ziehen kann. Dadurch muss die Luft nicht ausschließlich um die Flügelkanten nach unten strömen, starke bremsende Wirbel - besonders bei breiten Flügeln - werden damit vermieden. Auch gespreizte Handschwingen wirken wie die Winglets der Flugzeuge und reduzieren den induzierten Widerstand. Die Flügel werden beim normalen Geradeaus-Flug synchron gesteuert, aber bei Rollen um die Längsachse und scharfen Kurven asynchron. Bei starker Supination - etwa beim Rüttelflug - entsteht die Gefahr, dass die Strömung auf der Oberseite der Flügel abreißt. Um dies zu vermeiden, werden die Daumenfittiche abgespreizt. Im Gleitflug der Segler wird der negative Anstellwinkel und damit der Gleitwinkel durch mehr oder weniger starke Pronation verändert. Damit können gute Segler auch gegen den Wind starten und segeln, und zwar unter Ausnutzung der Schwerkraft und ohne kraftraubenden Ruderflug. Beim Kurvenflug haben die Außenflügel eine höhere relative Geschwindigkeit, erzeugen dadurch mehr Vor- und Auftrieb. Kurven im vortriebslosen Segelflug werden angesteuert, indem die bogeninneren Flügel stärker proniert werden und der Schwanz wie ein Seitenruder eingesetzt wird. Beim Sinkflug von Lerchen und Baumpiepern wird der aerodynamische Auftrieb und Vortrieb

auf Null gebracht und dafür nur der Strömungswiderstand eines Fallschirms genutzt. Beim gaukelnden Flug der Weihen werden die Flügel in einem deutlichen V-Winkel gehalten, sodass die aerodynamische Saugkraft zur Mitte gekippt und als Drehmoment wirkt. Geringste asynchrone Veränderungen im Anstellwinkel erlauben rasche Schwenks und einen blitzschnellen Jagdstoß, wobei die Weihe über den pronierten Flügel abkippt. Der muskuläre Kraftaufwand ist dabei sehr gering.

Verwendete Literatur:

1. Einhart Bezzel: Ornithologie. UTB 1977.
2. W. Nachtigall, K. Büchel: Bionik. Deutsche Verlagsanstalt. Stuttgart, München. 2000.
3. K. Wunderlich, W. Gloede: Natur als Konstrukteur. Edition Leipzig. 1977.
4. S. Klautke, K. Köhler, N. Krischke: Der Flug der Vögel. UB 178/16. Jahrg./Okt. 1992.
5. Wikipedia: Alula.

Für den Text verantwortlich: Hubert Schaller

Die Photos wurden beigetragen von den Tierphotographen Markus Gläsel, Olav Krüger und Gunther Zieger.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbuch der Ornithologischen Arbeitsgemeinschaft in Unterfranken Region 2](#)

Jahr/Year: 2012

Band/Volume: [2012](#)

Autor(en)/Author(s): Krüger O., Schaller Hubert

Artikel/Article: [II. Beiträge 83-139](#)