Auftrieb beim Flügelaufschlag

Horst Räbiger, Nürnberg 2015

Version 10.1

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung 2
2. Betriebsarten des Flügelaufschlags 6
3. Zeitlich sinusförmiger Bewegungsablauf 10
4. Auftriebsimpuls 12
5. Änderung der Auftriebsgröße nur mit Flügelverwindung 15
6. Drehung der Flügelwurzel 17
   6.1 Auftriebsgröße bei Drehung der Flügelwurzel 17
   6.2 Auftrieb in den Schlagendlagen 18
   6.3 Flügelbewegungen bei einem Schwan 21
   6.4 Phasenverschiebung der Auftriebsverlagerung an der Flügelwurzel 24
   6.5 Ausgleich der Trägheitskraft des Flügels 26
   6.6 Drehung der Flügelwurzel bei Ornithoptern 28
7. Abwinklung des Handflügels nach unten 29
   7.1 Abwinklung allgemein 29
   7.2 Abwinklung während des Aufschlags 30
   7.3 Flügel ausbreiten in der oberen Schlagendlage 33
8. Schwenken des Handflügels nach hinten 35
9. Neigung der Flügelschlagebene 38
10. Energiespeicherung mit Federn 39
11. Verwendung eines Drehzahlreglers 44
12. Anforderungen an die Ornithopter-Konstruktion 45
Hinweise zum Rechenprogramm „Orni 1“ 48
Quellenangaben 49

1. Einführung

Das Grundprinzip der Auftriebs- und Schuberzeugung beim Schlagflug wurde schon von Erich von Holst[1], 1943 beschrieben. In seinem Funktionsschema (siehe folgendes Bild 1) wird die Lage des Auftriebszentrums durch ein längs der Halbspannweite verschiebbares Flügelstück verkörpert. Am oberen Umkehrpunkt wird es in Richtung Flügelspitze und am unteren Umkehrpunkt zur Flügelwurzel verschoben. Über eine ganze Schlagperiode gesehen kann so, unter Beibehaltung der Auftriebskraft F_A der Schub F_S beim Abschlag größer werden als der zusätzliche Widerstand $-F_S$ beim Aufschlag.

Demnach kann eigentlich auch beim Flügelaufschlag der Auftrieb etwa so groß sein wie im Gleitflug. Gleichzeitig spielt der Aufschlag für die Schuberzeugung einer ganzen Schlagperiode eine entscheidende Rolle, auch wenn er selber insgesamt keinen positiven Schub erzeugt. Für eine optimale Gestaltung des Flügelaufschlags ist eine Konzentration des Auftriebs in Spannweitenmitte erforderlich. Die dazugehörigen, technischen Zusammenhänge wie das geschehen kann, sollen hier zumindest näherungsweise beschrieben werden.

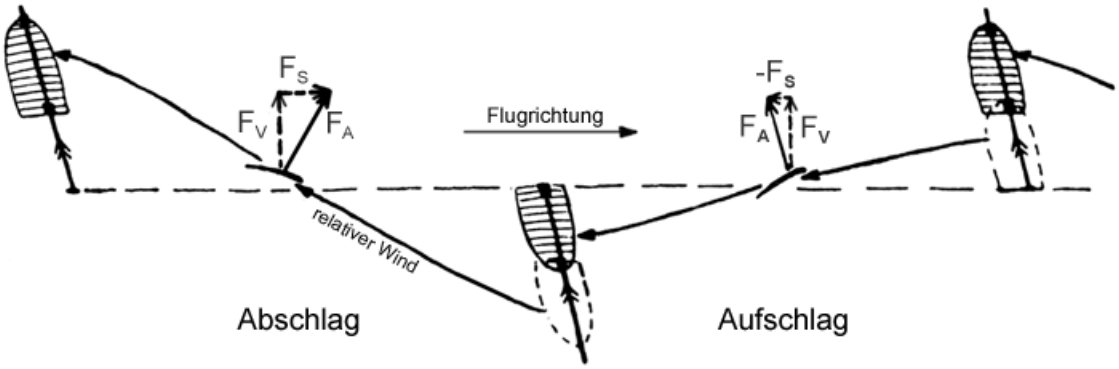


Bild 1 Grundprinzip der Auftriebs- und Schuberzeugung durch Auftriebsverlagerung beim Vogelflug, Erich von Holst[1], 1943

Bei der Erforschung des Vogelfluges wurde schon immer diskutiert, ob der Flügelaufschlag mit Muskelkraft oder mit aerodynamischen Kräften erfolgt. Zur Klärung der entsprechenden physikalischen Vorgänge, wird hier erst einmal mit einem technischen Schlagflügel gedanklich ein Versuch durchgeführt. Dazu wird ein Flügel in einem Windkanal an seiner Flügelwurzel drehbar montiert (siehe folgendes Bild 2). Bei einer Anströmung von vorne und positivem Anstellwinkel längs der ganzen Spannweite entwickelt sich der Auftrieb am Flügel. Ist er groß genug, wird die Flügelspitze angehoben.

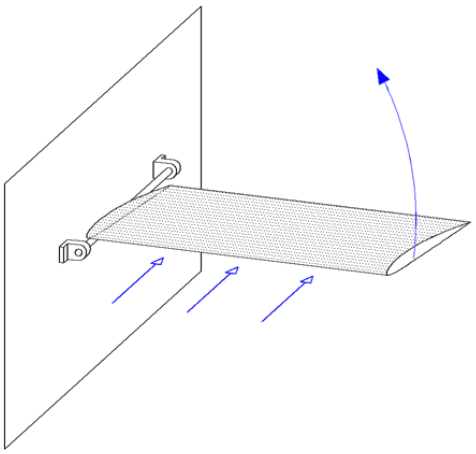


Bild 2 Ein an der Flügelwurzel drehbar montierter Flügel im Windkanal

Während der Drehbewegung nach oben wird insbesondere der äußere Flügelbereich mehr von oben angeströmt. Der Anstellwinkel wird dort kleiner oder sogar negativ. Für eine starke Kraftentfaltung ist das nicht optimal. Um diesen Effekt auszugleichen, wird der Flügel von der Flügelwurzel ausgehend verwunden. Der Einstellwinkel an der Flügelspitze wird so groß gemacht, dass dort der Anstellwinkel auch während der Drehbewegung des Flügels positiv ist. Dabei ist eine ständige Anpassung an die Drehgeschwindigkeit des Flügels zweckmäßig.

Man kann nun den Flügel auch frei drehbar anordnen. Er wird dann nicht nur nach oben schlagen, sondern sich kontinuierlich um seine Achse drehen. Der drehende Flügel kann einen Generator antreiben. Er arbeitet dann wie der Flügel eines Windrades und gibt Energie ab. Zur Erinnerung:

Auftriebskraft [N] x Druckpunktabstand von der Flügelwurzel [m] = Drehmoment [Nm]

Drehmoment [Nm] x Drehwinkel [rad] = Arbeit oder Energie [Nm]

Die Energie die der Flügel an den Generator abgibt, entzieht er vorher durch einen zusätzlichen Widerstand der Luftströmung. Diese wird im Windkanal abgebremst. Im freien Flug ist es dagegen die Masse des Fluggerätes, deren Geschwindigkeit reduziert wird.

Der Aufschlag eines Schlagflügels kann auf die gleiche Weise funktionieren. Es ist aber bekannt, dass der Abschlag wie ein Propeller arbeitet. Dass nun der Aufschlag wie ein Windrad funktionieren soll, erscheint daher zunächst widersinnig. Da würde ja der Aufschlag die Wirkung des Abschlages wieder zunichtemachen. Aus dem folgendem Bild 3 kann man jedoch ablesen, dass beim Aufschlag im Bereich mit positivem Anstellwinkel Auftrieb und mit negativem Anstellwinkel auch Schub erzeugt werden kann. Beides sind positive Eigenschaften. Es kommt also auf die Details an. Der Vorteil eines

Aufschlags mit der Funktion als Windrad ist der dabei entstehende Auftrieb. Wird beim Aufschlag kein Auftrieb erzeugt, so muss nur beim Abschlag der ganze Auftrieb des Fluggerätes erzeugt werden.

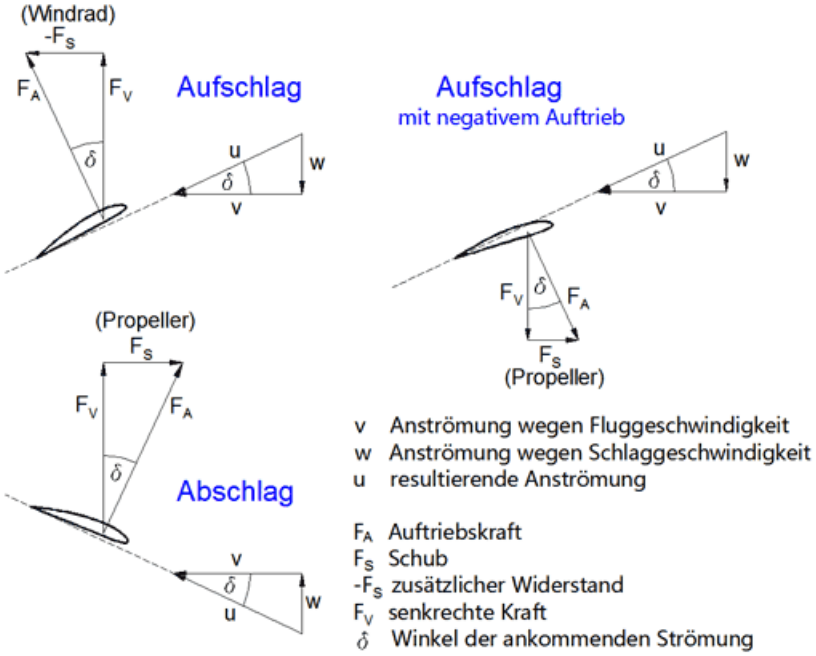


Bild 3 Kräfte am Schlagflügel an einem Flügelort im Bereich der Flügelspitze
Profil- und induzierter Widerstand sind hier nicht dargestellt.
Man kann den zusätzlichen Widerstand $-F_S$ beim Aufschlag mit positivem Auftrieb auch als Betriebs- oder Arbeitswiderstand der Windradfunktion bezeichnen.

Bei der Anwendung der Kraftbezeichnungen aus Bild 3 gibt es noch eine Besonderheit. Sie entsteht insbesondere, weil „Schub“ und „zusätzlicher Widerstand“ dieselbe physikalische Größe benennen. Es ist immer dieselbe Komponente der Auftriebskraft. Sie wechselt beim Nulldurchgang vom Aufschlag zum Abschlag oder beim Aufschlag längs der Spannweite jedoch nicht ihr Vorzeichen, sondern die Bezeichnung. Das ist irreführend und es kommt zu Missverständnissen über die Ursache des zusätzlichen Widerstandes. Der ist nichts anderes als Schub entgegen der Flugrichtung. Der Bezeichnungswechsel wird aber von Biologen bei Vögeln, im Modellbau bei Ornithoptern und auch hier angewendet. Es ist jedoch erforderlich, diese physikalische Größe zumindest bei Berechnungen durchgehend als Schub zu bezeichnen und dann den Vorzeichenwechsel zu akzeptieren.

In der gängigen Theorie des Vogelflugs nimmt man meistens an, dass beim Flügelaufschlag im Reiseflug die Handflügel ohne nennenswerte Krafterzeugung nach oben geführt werden (siehe Bild 4).

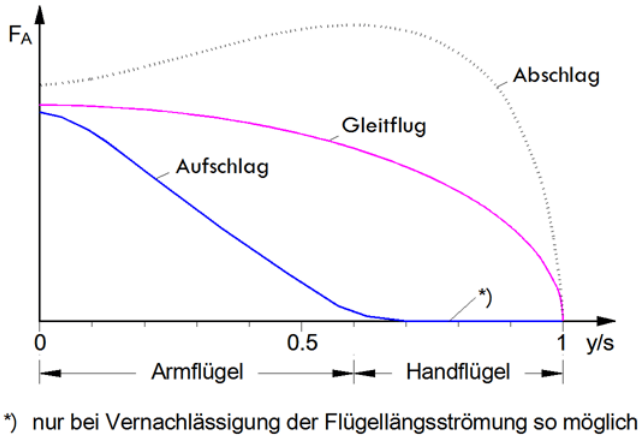


Bild 4 Ungefährer Verlauf der Auftriebsverteilungen entsprechend der allgemein gebräuchlichen Theorie vom Reiseflug der Vögel. Die hier dargestellte Auftriebsverteilung des Abschlags hat schon J. Rayner[2] in seiner Beschreibung des Vogelflugs verwendet. Auch bei Ornithoptern mit geraden Flügel stellt man sich den Flügelaufschlag im Handflügelbereich etwa so vor.

Der Armflügel alleine kann aber nicht viel Auftrieb erzeugen. Auch von einer Vergrößerung des Anstellwinkels oder anderen auftriebserhöhenden Maßnahmen des Armflügels ist nicht die Rede. Demnach wäre der Auftrieb der Vögel beim Aufschlag viel kleiner als im Gleitflug. Beim Abschlag soll dagegen der meiste Auftrieb erzeugt werden. Die Nachteile so einer Flugweise sind bei den heutigen Ornithoptern erkennbar.

Vögel werden oft wegen ihrer leichten Bauweise bewundert. Das gilt beispielsweise für hohle Knochen, federleichte Federn, Luftsäcke im Körper und für verschiedene andere biologische Besonderheiten. Vögel als Ganzes haben aber ein relativ hohes Gewicht, jedenfalls aus der Sicht eines Flugmodellbauers. Derzeitige Ornithopter sind dagegen meist sehr leicht. In Tabelle 1 sind einige Beispiele aufgeführt.

Ornithopter	Spann-weite [m]	Gewicht [kg]	Flächen-belastung [N/m²]	**Vögel** (H. Tennekes[3])	Spann weite [m]	Gewicht [kg]	Flächen-belastung [N/m²]
Cybird	0,9	0,29	16	Rabenkrähe	0,8	0,6	46
Park Hawk 1	1,2	0,43	17	Wanderfalke	1,1	0,8	62
Slow Hawk 2	1,2	0,44	13	Silbermöwe	1,4	1,1	52
SmartBird	2,0	0,45	9	Weißstorch	1,9	3,1	61
				Graugans	1,6	3,2	115
				Höckerschwan	2,4	11,8	170

Tabelle 1. Vergleich der Fluggewichte und Flächenbelastungen

Heutige Ornithopter haben zwar sehr leistungsstarke Antriebe, vertragen aber trotzdem kaum eine Zuladung. Eine Rumpfverkleidung zum Schutz der Mechanik ist oft schon zu schwer für sie. Dieser Auftriebsschwäche wird durch große Flügelwurzeltiefe (ähnlich wie bei Fliegenden Füchsen oder Fledermäusen) und durch starkes Aufrichten des Rumpfes etwas entgegengewirkt (siehe Bild 5). Dabei werden insbesondere der Anstellwinkel im rumpfnahen Flügelbereich und so der Auftrieb dort vergrößert. Außerdem wird durch die Neigung der Schlagebene gleichzeitig der Schub etwas nach oben gerichtet und damit fehlenden Auftrieb ersetzt. Der Leistungsbedarf dieser Flugweise ist beträchtlich.

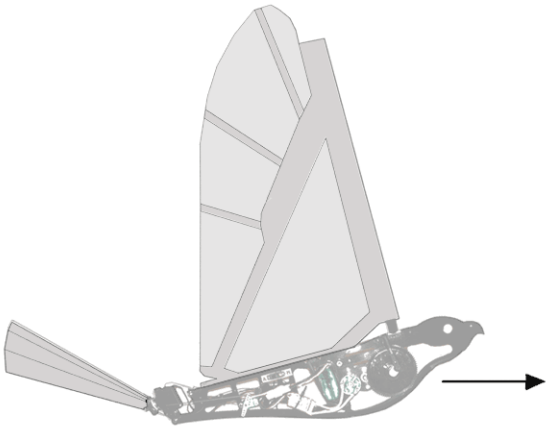


Bild 5
Ornithopter im Horizontalflug

Die Gestaltung des Flügelaufschlags hat also sicherlich einen wesentlichen Einfluss auf den Leistungsverbrauch und die Tragfähigkeit der Ornithopter.

2. Betriebsarten des Flügelaufschlags

Eine besondere Auftriebsverteilung für den Aufschlag zeigt folgendes Bild 6. Im rumpfnahen Bereich ist der Auftrieb positiv. Mit seiner Bewegung in Richtung der Auftriebskraft arbeitet der Schlagflügel dort als Windrad. Dadurch entsteht ein zusätzlicher Widerstand entgegen der Flugrichtung. Im übrigen Bereich nahe der Flügelspitze ist der Auftrieb negativ. Auf diese Weise wirkt Schlagflügel dort wie ein Propeller und erzeugt Schub.

Die Schlagbewegung nahe der Flügelspitze ist deutlich größer als nahe der Flügelwurzel. Entsprechend verhält sich auch die jeweils verrichtete Arbeit entlang der Halbspannweite. Der kleinere Abtriebsbereich nahe der Flügelspitze verrichtet hier während der Drehbewegung die gleiche Arbeit wie der größere Auftriebsbereich nahe der Flügelwurzel. Zusätzlicher Widerstand und Schub heben sich in diesem speziellen Falle gerade gegenseitig auf. Auch die entgegengesetzten Drehmomente von Auftrieb und Abtrieb sind genau gleich groß. Der Flügel kann so ohne äußere Kraft nach oben bewegt werden.

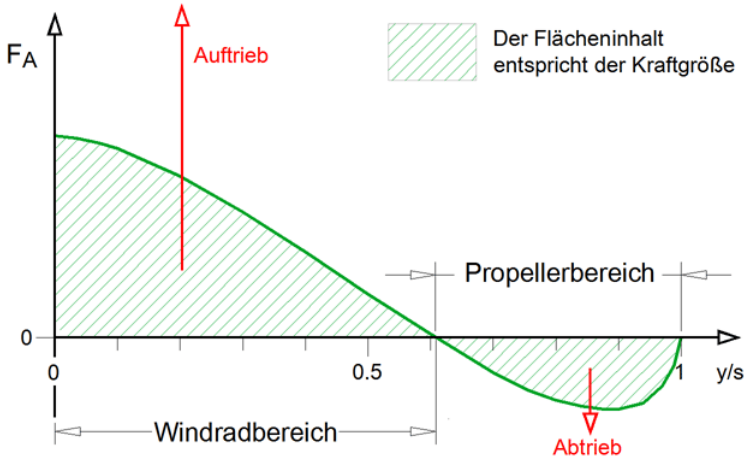


Bild 6 Auftriebsverteilung beim Flügelaufschlag mit ausgeglichenem Drehmoment und ausgeglichenem Schub. Sie markiert die Grenze zwischen überwiegendem Propellerbetrieb und überwiegendem Windradbetrieb.
Der Druckpunkt dieser Verteilung liegt genau an der Flügelwurzel.
Berechnet mit dem Rechenprogramm „Orni 1“[4]

F_A = Auftriebskraft
y/s = relative Halbspannweite

Aus der Darstellung kann man eine wichtige, allgemein gültige Gesetzmäßigkeit für Schlagflügel ablesen. Flügelbereiche mit der Auftriebskraft in Richtung der Flügelbewegung arbeiten als Windrad. Flügelbereiche mit der Auftriebskraft entgegen der Bewegung arbeiten als Propeller. Gleichzeitig wird in diesem Bild eine der Möglichkeiten erkennbar, wie sich die Windradenergie die im inneren Flügelbereich entsteht, nutzen lässt. Sie kann unmittelbar im äußeren Flügelbereich zur Schuberzeugung eingesetzt werden. Der innere Flügelbereich treibt dabei den äußeren Flügelbereich in Aufschlagrichtung an. Dies ist wohl das wichtigste Verfahren zur Rückgewinnung von Windradenergie beim Schlagflügelaufschlag. Es wird sicherlich auch von Vögeln genutzt.

Das etwas Überraschende an dieser Auftriebsverteilung ist, dass der ohne Drehmoment nach oben geführte Schlagflügel immer noch etwas Auftrieb erzeugt (27 % des Gleitflugauftriebs mit elliptischer Verteilung). Die nach oben gerichtete Kraft des Windradbereiches ist ja deutlich größer als die nach unten gerichtete Kraft des Propellerbereiches. Damit bestätigt sich eine wichtige Eigenschaft des Flügelaufschlags. Auch bei ihm kann ohne zusätzlichen Energieverlust Auftrieb erzeugt werden.

Bei den meisten derzeitigen Ornithoptern ist es grundsätzlich schwierig, beim Flügelaufschlag deutlichen Auftrieb zu erzeugen. Ihr Antriebsmotor ist nicht nur beim Abschlag sondern auch beim Aufschlag voll in Betrieb. Das entspricht etwa der Flugweise von Kolibris im Schwebeflug. Nur der Flügel kann dabei die abgegebene Motorenergie aufnehmen. Um eine entsprechende Gegenkraft zu entwickeln, ist der Flügel gezwun-

gen auch beim Aufschlag mit einem großen Propellerbereich arbeiten. Dabei entsteht zwar sehr viel Schub, dafür aber wenig Auftrieb. Die Auftriebsverteilungen von Ornithoptern die auf diese Weise fliegen werden dann etwa wie in Bild 7 aussehen.

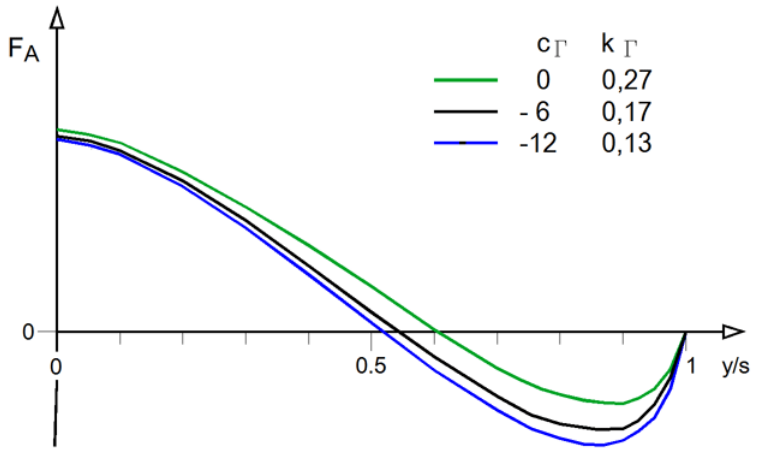


Bild 7 Dies sind Auftriebsverteilungen für den Aufschlag im Propellermodus.
Die Auftriebsverteilung ohne Drehmoment ist zum Vergleich mit dargestellt, mit Verteilungsparameter bzw. Zirkulationskennzahl (c-Gamma) $c_\Gamma = 0$.
Der Zirkulationsfaktor k_Γ (k-Gamma) beschreibt die Größe des Auftriebs bezogen auf den des Gleitflugs.
F_A = Auftriebskraft
y/s = relative Halbspannweite

Die Bereiche mit positivem und negativem Auftrieb sind relativ kräftig ausgebildet und liegen direkt nebeneinander. Der induzierte Widerstand ist daher groß. Der resultierende Gesamtauftrieb ist dagegen sehr klein. Überschüssige Windradenergie ist nicht vorhanden. Im Gegenteil, die Schuberzeugung überwiegt und ist bei so einem Flügelaufschlag beachtlich. Das Flügelprofil muss dabei aber im äußeren Flügelbereich beim Aufschlag mit stark negativen und beim Abschlag mit stark positiven Anstellwinkeln arbeiten können. Das ist fast nur mit Membranflügeln möglich. Sie können die Profilform flexibel nach oben und unten wölben.

Das folgende Bild 8 zeigt einige Auftriebsverteilungsformen für den Aufschlag mit deutlicher Auftriebserzeugung. Sie reichen von der Auftriebsverteilung mit ausgeglichenem Drehmoment bis hin zu einer Auftriebsverteilung mit durchgehend positivem Auftrieb. Damit decken diese Verteilungen etwa den Arbeitsbereich eines Flügelaufschlags im Windradmodus ab.

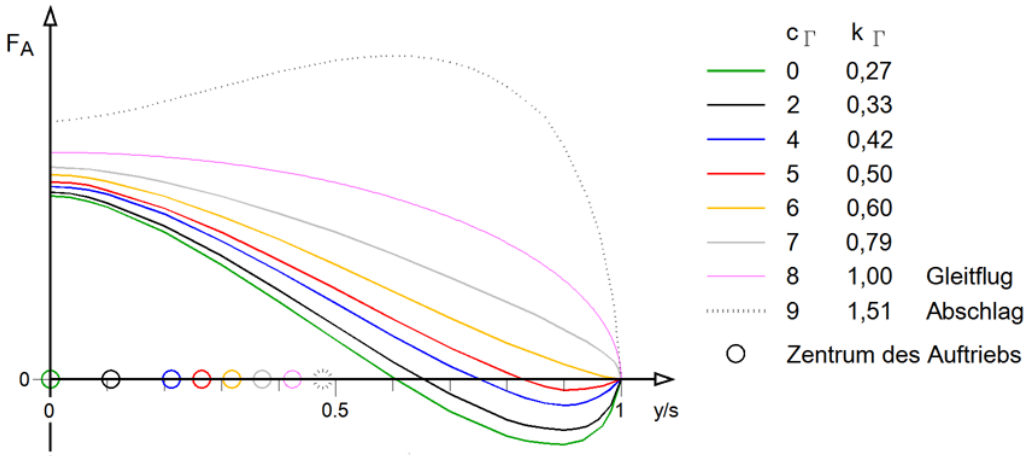


Bild 8 Verschiedene Auftriebsverteilungen für den Aufschlag im Windradmodus. Zum Vergleich sind auch folgende Auftriebsverteilungen mit dargestellt:

$c_\Gamma = 0$, mit ausgeglichenem Drehmoment

$c_\Gamma = 8$, als Beispiel für den Gleitflug

$c_\Gamma = 9$, als Beispiel für den Abschlag

Der Zirkulationsfaktor k_Γ (k-Gamma) beschreibt die Größe des Auftriebs bezogen auf den des Gleitflugs.

In diesem Vergleich hat die Auftriebsverteilung mit dem Verteilungsparameter[A] bzw. der Zirkulationskennzahl $c_\Gamma = 5$ den geringsten induzierten Widerstand. Die Länge ihres Propellerbereiches entspricht etwa der freien Länge der Schwungfedern bei großen Vögeln. Diese Auftriebsverteilung gleicht auch derjenigen, die Otto Lilienthal skizziert hat (siehe Bild 9). Messtechnisch nachgewiesen wurde sie allerdings bisher weder bei Vögeln noch bei technischen Schlagflügeln.

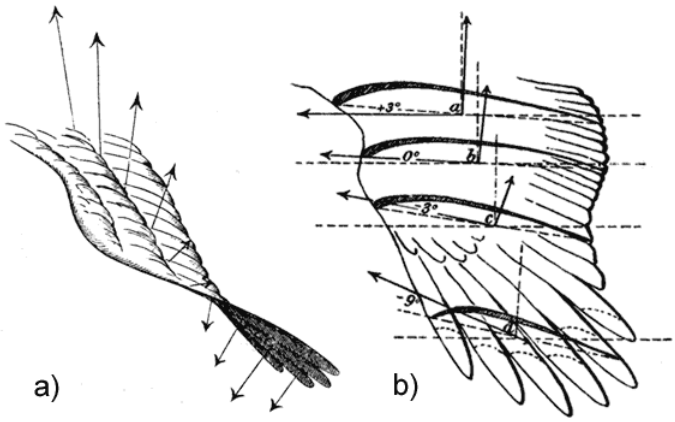


Bild 9 Zwei Beispiele von Auftriebsverteilungen beim Flügelaufschlag von Otto Lilienthal[5] (1889)
Im Bild „a“ sind allerdings die Kräfte nahe der Flügelwurzel zu sehr nach vorne gerichtet.

[A] siehe Handbuch „Wie Ornithopter fliegen“ Gleichung 2.4 und 2.6

Wird beim Aufschlag das Drehmoment des Windradbereiches nicht mehr im vollen Umfang durch das entgegengesetzte Drehmoment des Propellerbereiches ausgeglichen, so muss der Kräfteausgleich irgendwie anders erfolgen. Ohne Gegenkraft kann sich sonst die Auftriebskraft nicht entwickeln. Man muss dann nach anderen Verwendungsmöglichkeiten der überschüssigen Windradenergie suchen (siehe Kapitel 10).

3. Zeitlich sinusförmiger Bewegungsablauf

In obigem Bild 8 werden nur Auftriebsverteilungen des Aufschlags gezeigt, wie sie in der Mitte der Schlagbewegung vorliegen. Wie der Übergang zwischen Auf- und Abschlag erfolgen soll, ist damit nicht festgelegt. Im Allgemeinen geht man aber in der Ornithoptertheorie von einem zeitlich sinusförmigen Verlauf der Bewegungen und der aerodynamischen Bedingungen aus. In folgendem Bild 10 ist die Schlagbewegung des Flügels in Form seiner Winkelgeschwindigkeit ω zusammen mit dem jeweiligen Schlagwinkel Φ dargestellt. Die Änderung der Auftriebsverteilung ist, zumindest bei aeroelastischer Flügelverwindung, abhängig von der Winkelgeschwindigkeit. In deren Verlauf sind Beispielwerte der Zirkulationskennzahlen c_Γ zu verschiedenen Zeitpunkten mit angegeben und darunter die betreffenden Auftriebsverteilung in Kleinformat dargestellt.

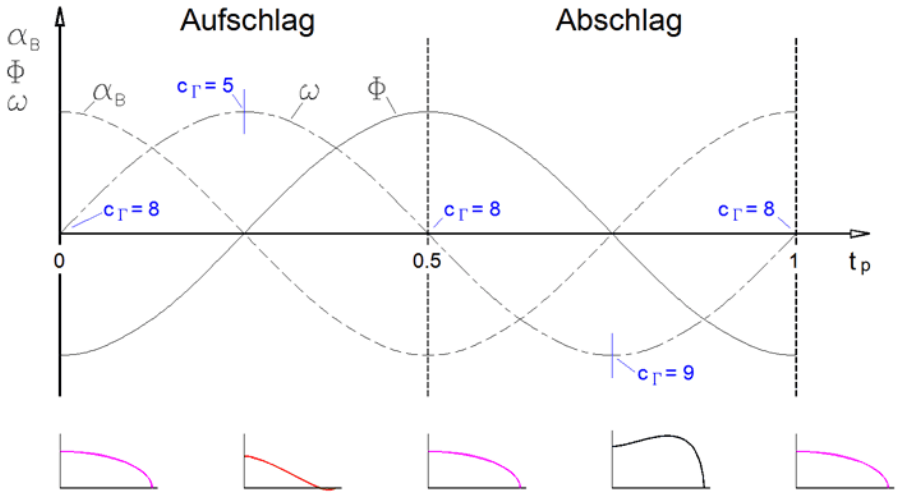


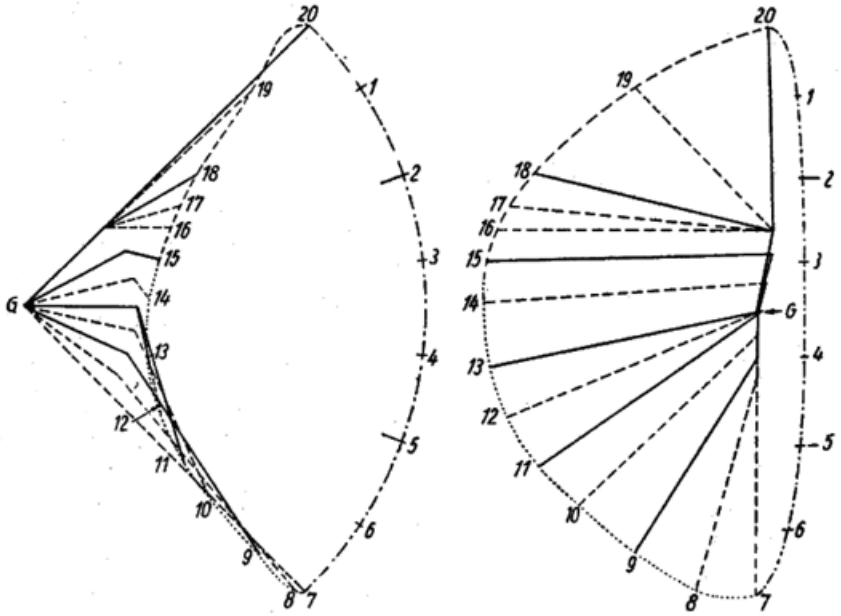
Bild 10 Prinzipieller, zeitlich sinusförmiger Verlauf der Schlagflügelbewegung

Φ Schlagwinkel
ω Winkelgeschwindigkeit
α Winkelbeschleunigung

Man muss sich aber im Klaren sein, dass unter diesen Bedingungen die hier angegebenen Auftriebsverteilungen von Auf- und Abschlag (siehe Bild 8) nur für jeweils einen ganz kurzen Moment in Schlagmitte gelten. In der übrigen Zeit, also während etwa

99 % der Schlagperiode, findet eine Auftriebsverlagerung zwischen diesen Verteilungsformen statt – eine etwas ungewöhnliche Vorstellung. Aus aerodynamischer Sicht ist die ständige Auftriebsverlagerung aber das Wesentliche des Schlagflugs. Die Angabe einer "Auftriebsverteilung für den Aufschlag" ist also eigentlich irreführend, da sie nur für einen einzigen Zeitpunkt gilt. Dort wird sie aber zur Beschreibung des Aufschlags benötigt.

Aufschlussreich sind dazu die Phasen der Flügelschlagbewegung einer Nebelkrähe in folgendem Bild 11 von Hans Oehme[6]. Die nahezu gleichen Abstände zwischen den Stellungen der Flügelspitzen beim Abschlag zeigen, dass die Schlaggeschwindigkeit zeitlich nicht sinusförmig, sondern nahezu konstant verläuft.



Rückansicht Seitenansicht

Bild 11 Schema der Flügebewegung einer Nebelkrähe, mit dem Schulterlager G und der Bahnline der Flügelspitze, nach einer Zeitlupenaufnahme von Hans Oheme[6]. Wahrscheinlich handelt es sich um einen Flug mit großem Schubbedarf.

Eine weitgehend konstante Abschlaggeschwindigkeit hat gegenüber dem sinusförmigen Verlauf einen großen Vorteil. Der starke Schub und große Auftrieb liegen nicht nur für einen kurzen Moment in Schlagmitte vor, sondern bleiben über längere Zeit bestehen. Außerdem sind, bei gleichem mittlerem Auftrieb, das Maximum des Auftriebs und somit auch die Anforderungen an das Flügelprofil kleiner (siehe hierzu Bild 13).

4. Auftriebsimpuls

Um beim Schlagflug die Wirkung einer Kraft zu beurteilen, muss man neben der ihrer Größe auch ihre Wirkungsdauer berücksichtigen. Dazu wird das Produkt aus Kraft mal Zeit gebildet. Das Ergebnis wird als Kraftimpuls bezeichnet.

Kraft [N] x Wirkungsdauer [s] = Kraftimpuls [Ns]

In Bild 12 ist links der Auftriebsimpuls beim Gleitflug im Zeitraum einer Schlagperiode t_p dargestellt. Auf der rechten Seite sieht man den prinzipiellen Auftriebsverlauf, wie er sich bei gleicher Auftriebsimpuls-Gesamtgröße aus der allgemein gebräuchlichen Theorie vom Vogelflug ergibt (siehe Bild 4).

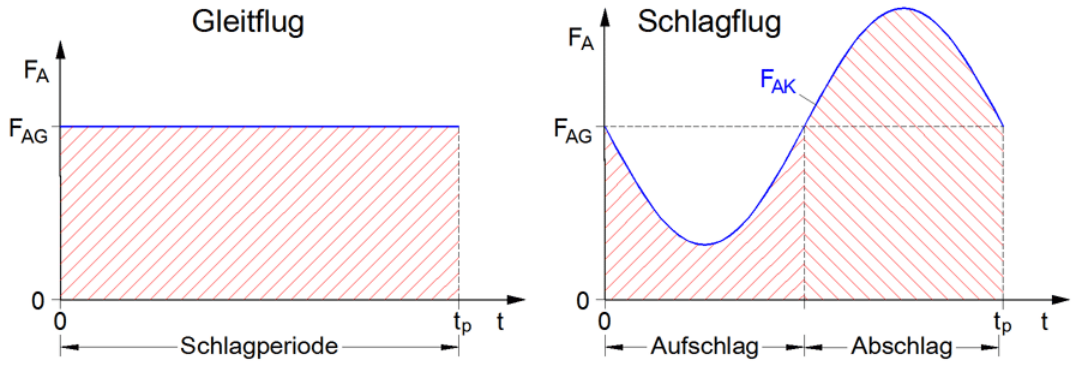


Bild 12 Die Flächen unter den Auftriebsverläufen von Gleit- und Schlagflug, im Zeitabschnitt einer Schlagperiode t_p entsprechen dem jeweiligen Auftriebsimpuls. In der Flugpraxis müssen beide Auftriebsimpulse gleich groß sein.

In folgendem Bild 13 ist zum sinusförmige Auftriebsverlauf der beiden Takte (blau) auch der jeweilige Mittelwert[B] (rot) mit dargestellt. Der gesamte Auftriebsimpuls (schraffiert) der beiden Takte entspricht dem des Gleitfluges.

Bei Konstanthaltung der Schlaggeschwindigkeit über einen längeren Zeitraum, hier beispielsweise über die halbe Taktzeit (schwarz), kann der Maximalwert des Auftriebs gesenkt werden, in diesem Fall um 10 %. Die Impulsgröße bleibt dabei erhalten. Für den Aufschlag ist die dazu passende Auftriebsverteilung zu wählen, die dann auch über längere Zeit konstant bleibt.

[B] Mittelwert einer Sinushalbwelle = ihr Scheitelwert · 2/Π

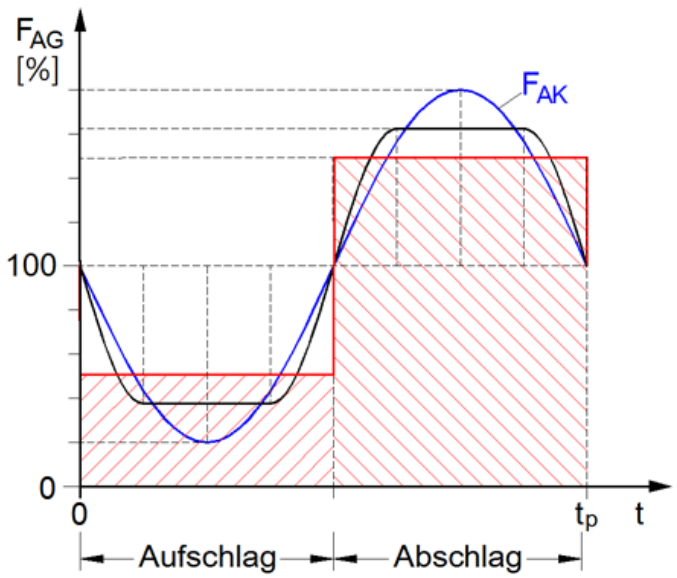


Bild 13 Auftriebsverlauf bei einem Schlagflügel, der beim Aufschlag vom Motor angetrieben wird. Die Skalierung der Auftriebskraft ist auf die Größe des Auftriebs im Gleitflug bezogen, mit F_{AG} = 100 %.

Das in Bild 13 verwendete Minimum des Auftriebs in Aufschlagmitte (20 % des Gleitflugauftriebs) liegt dann vor, wenn bei einem Ornithopter der Schlagflügel beim Aufschlag vom Motor angetrieben wird. Der Flügel ist dann gezwungen im Propellermodus arbeiten (siehe hierzu Bild 7). Um dann trotzdem während einer Schlagperiode einen Auftriebsimpuls in der Größe des Gleitflugauftriebs zu erzielen, muss der mittlere Auftrieb des Abschlags drastisch erhöht werden, hier auf 149 %. Sein Maximalwert in Abschlagmitte liegt sogar bei 180 %. Dazu kommt, dass beim Abschlag der maximale örtliche Auftriebsbeiwert längs der Spannweite sowieso schon ca. 20 % größer ist als im Gleitflug (siehe Bild 8). In der Summe müsste also der maximale örtliche Auftriebsbeiwert beim Abschlag doppelt so groß sein wie der im Gleitflug.

Für den Auftrieb ist es also nicht ratsam, den Flügel beim Aufschlag mit einem Motor anzutreiben. Stattdessen sollte er mit deutlich mehr Auftrieb von alleine nach oben schlagen. Dazu ist der Flügel im Windradmodus zu betreiben und seine Bewegung nach oben zu hemmen. Letzteres kann man zum Beispiel erreichen, indem man den Motor beim Aufschlag mit dem Spannen einer Kompensationsfeder belastet (siehe Kapitel 10) oder die Drehzahl mit einem Regler konstant hält (siehe Kapitel 11).

Die extrem hohen Anforderungen an die Auftriebserzeugung beim Aufschlag werden noch durch einen weiteren Effekt gesteigert. Die beiden Flügelhälften sind während der Schlagbewegung nur sehr kurzzeitig in annähernd gestreckter Stellung. In der übrigen Zeit weist die Auftriebskraft am Flügel aber nicht nur nach oben, sondern auch etwas nach innen oder außen (siehe folgendes Bild 14).

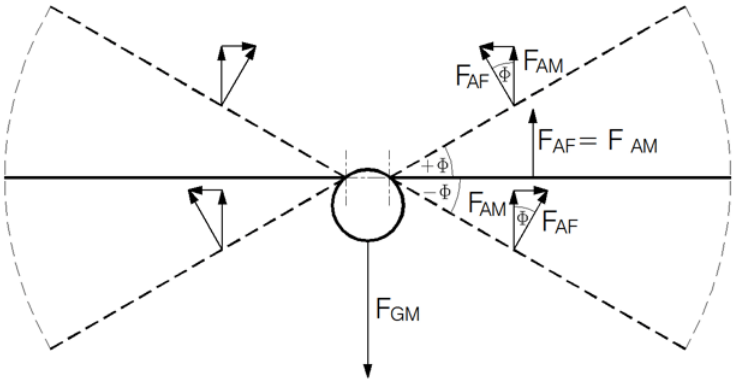


Bild 14 Lage der Auftriebskraft außerhalb der gestreckten Flügelstellung

F_{AF} Auftriebskraft auf den Flügel bezogen
F_{AM} Auftriebskraft auf das Modell bezogen
F_{GM} Gewichtskraft des Modells

Dadurch wird der für das Modell nutzbare Auftrieb F_{AM} kleiner. In abgeschwächter Form reduziert auch die Neigung der Auftriebskraft nach vorne oder hinten die Auftriebswirkung. Bei einem Schlagwinkel von ±30 Grad und zeitlich sinusförmigem Bewegungsablauf ist die auf das Modell bezogene Auftriebswirkung insgesamt um etwa 8 %[C] kleiner als mit gestrecktem Flügel. Diese Auftriebsminderung muss durch größere Auftriebserzeugung ausgeglichen werden und ist ein unvermeidbarer Nachteil der Schlagflügeltechnik. Es ist also vorteilhaft, wenn beim Abschlag der Auftrieb bei der Verlagerung nach außen sich automatisch vergrößert (siehe Bild 8).

Der maximale Auftrieb des Abschlags in Bild 13 ist mit den zulässigen Auftriebsbeiwerten der gebräuchlichen Flügelprofile alleine nicht zu erreichen. In der Regel muss dazu die Flügeltiefe gegenüber einem im Gleitflug normal belasteten Flügel etwa verdoppelt werden. Auch aus Festigkeitsgründen wächst damit das Flügelgewicht entsprechend. Im Gleitflug kann man dann nur noch mit kleiner Flächenbelastung und folglich nur mit kleiner Geschwindigkeit fliegen, zumindest bei optimalem Anstellwinkel. Der Profilwiderstand verdoppelt sich. Für den Schubausgleich ist eine höhere Schlagfrequenz erforderlich. Beim Aufschlag muss man die stark vergrößerte Flügelfläche sozusagen mitschleppen, obwohl die Auftriebserzeugung dabei deutlich kleiner ist als im Gleitflug. Darüber hinaus vergrößert sich wegen der großen Auftriebskraft beim Abschlag auch das Drehmoment für das Getriebe. Auch der Motorstrom und der elektronische Regler sind davon betroffen. Daneben zeigt das Modell ein unschönes Auf- und Ab- Pendeln. Eine Alternative ist die drastische Reduzierung des Fluggewichts (siehe

[C] Der Wert wurde mit einer kleinen Ergänzung im Rechenprogramm „Orni 1“ ermittelt.

Tabelle 1). Beim Aufschlag nur sehr wenig Auftrieb zu erzeugen hat also eine ganze Reihe deutlicher Nachteile.

Eine andere Möglichkeit den Auftrieb zu erhöhen ist die Steigerung der Fluggeschwindigkeit. Das erhöht aber den Profilwiderstand und erfordert weiterhin eine hohe Antriebsleistung beim Abschlag. Auch der Restwiderstand ist in diesem Falle von der Widerstandserhöhung betroffen. Gleichzeitig wird der Wechsel zwischen Gleit- und Schlagflug schwieriger.

Unter Beibehaltung der Auftriebsverteilungen und der Dauer der Schlagperiode verändern sich Auftrieb und Schub auch bei Veränderung des Taktzeitverhältnisses von Aufschlag zu Abschlag. Bei Verkürzung des Aufschlags wird der Gesamtschub von Auf- und Abschlag kleiner und der Gesamtauftrieb größer (siehe Handbuch[7], Kapitel 8.5 und Bild 9.6). Wie in Folgendem noch beschrieben wird, bereitet aber der kleiner werdende Schub bei der Verbesserung der Effizienz auch so schon genug Probleme. Die Taktzeitveränderung wird hier daher nicht weiter untersucht. Bei schubstarken Modellen ist es aber eine Möglichkeit den Auftrieb zu vergrößern. Die Schubstärke wird auch noch durch die Schlagfrequenz bestimmt. Aber auch das ist hier nicht das Thema. Hier wird generell von einer gleichbleibenden, mittleren Schlagfrequenz[D] ausgegangen.

5. Änderung der Auftriebsgröße nur mit Flügelverwindung

Im Rechenprogramm „Orni 1“[4] werden bei einem rechteckigen Flügel nur Verwindungen berechnet, die sich während der Schlagbewegung im Flug aus der Änderung frei wählbarer Auftriebsverteilungen ergeben. Andere Flügelbewegungen sind nicht erfasst. Damit ändert sich bei jeder Verlagerung des Auftriebs automatisch auch dessen Größe. Mit Hilfe des Zirkulationsfaktors und seiner Verknüpfung von Verlagerung und Größenänderung, wird der Einstellwinkel an der Flügelwurzel konstant gehalten. Es wird also nur mit der Flügelverwindung gearbeitet.

Bei Konstanthaltung des Anstellwinkels an der Flügelwurzel wird demnach der Auftrieb bei seiner Verlagerung in Richtung der Flügelwurzel immer kleiner. Man darf also beim Aufschlag den Auftrieb nicht allzu weit zur Flügelwurzel verlagern. Der zusätzli-

---

[D] Die mittlere Schlagfrequenz f_m [Hz] bei Vögeln beträgt etwa

$$f_m = e^{\log\frac{10}{m_V}}$$

mit der Masse des Vogels m_V [kg], siehe Hertel Heinrich. Struktur Form Bewegung, Biologie und Technik. Krausskopf-Verlag GmbH, Mainz 1963
Je größer die Verlagerung des Auftriebs, umso größer ist die Schubänderung bei Variation der Schlagperiode.

che Widerstand ist dann aber noch relativ groß. Die Veränderungen sind aus folgendem Bild 15 ersichtlich.

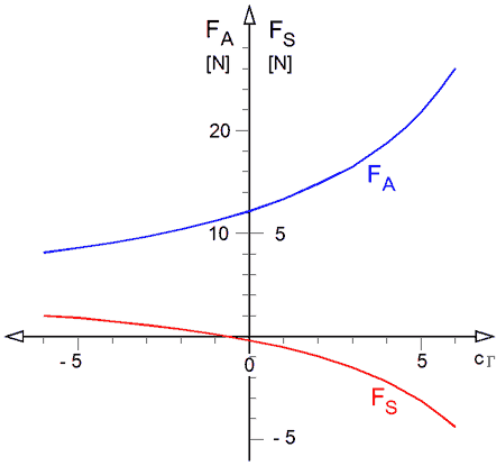


Bild 15 Verlauf von Auftriebskraft F_A und Schubkraft F_S beim Flügelaufschlag in Abhängigkeit von der Zirkulationskennzahl c_Γ (c-Gamma), am Beispiel eines rechteckigen Flügels, berechnet mit dem Rechenprogramm „Orni 1“[4]

Bei zunehmender Konzentration des Auftriebs in Spannweitenmitte kann man sich gut vorstellen, dass die Querströmung längs des Flügels immer stärker wird. Im Rechenprogramm wird das allerdings durch den immer kleiner werdenden Auftrieb weitgehend ausgeglichen. Der induzierte Widerstand steigt so nur geringfügig an. Wenn man allerdings den Auftrieb beim Aufschlag vergrößert, wird die Querströmung bzw. der induzierte Widerstand zum Problem. Vögel wenden als Gegenmaßnahme die Abwinklung des Handflügels an. Dieser wirkt dann wie ein Winglet oder eine Endscheibe und reduziert so die Strömung längs des Flügels und auch den Randwirbel. Vielleicht hilft bei Ornithoptern statt einer Abwinklung auch schon ein Grenzschichtzaun zwischen Arm- und Handflügel, um die Querströmung am Flügel zu reduzieren.

Beim Bestreben den Auftrieb beim Aufschlag groß zu machen, sehe ich die Grenze der Auftriebsverlagerung zur Flügelwurzel etwa bei der Zirkulationskennzahl $c_\Gamma = 5$. Der Auftrieb beträgt dann noch 50 % des Auftriebs mit elliptischer Verteilung (Bild 8). Eine weitere Verlagerung in Richtung Flügelwurzel nur durch Flügelverwindung erscheint nicht sinnvoll. Das gilt zumindest für rechteckige Flügel mit einem einheitlichen Profil längs der ganzen Spannweite. Für Ornithopter sind 50 % des Gleitflugauftriebs beim Aufschlag sicherlich schon ein ganz passabler Wert. Der dabei erreichbare Schub reicht aber normalerweise nur für den Horizontalflug oder einen sehr flachen Steigflug (es sei denn man arbeitet mit hoher Schlagfrequenz).

Bei der Vergrößerung des Auftriebs beim Aufschlag muss man generell auch den Auftrieb beim Abschlag im Auge behalten. Der kann ja dann kleiner werden. Neben der Anpassung der Auftriebsverteilung kommt dafür auch eine kleinere Fluggeschwindigkeit in Betracht. Zumindest im ersteren Fall bedeutet das aber weniger Schub.

6. Drehung der Flügelwurzel

6.1 Auftriebsgröße bei Drehung der Flügelwurzel

Durch Drehung der Flügelwurzel kann man den mit der Flügelverwindung erzielten Auftrieb beim Aufschlag weiter steigern. Im Rechenmodell „Orni 1“ muss man dazu die Verknüpfung von Verlagerung und Größenänderung aufheben. Dies gelingt durch Eingabe geeigneter Werte für den eigentlich nicht als Eingangsparameter vorgesehenen „Zirkulationsfaktor“ ($k_{\Gamma 1}$ = 0,5 bis 1,2). Die Größe des Auftriebs lässt sich auf diese Weise gezielt verändern. Gleichzeitig ändert sich der Einstellwinkel an der Flügelwurzel. Das betrifft aber nur die Flügeldrehung mit dem Maximum in Schlagmitte. In Zeitlupenaufnahmen von Vögeln konnte ich so eine Drehung früher nicht erkennen. Erich v. Holst[1] hat sie aber zur Vergleichmäßigung des Auftriebs vorgeschlagen.

Man kann auf diese Weise den Auftrieb beim Aufschlag z. B. so weit erhöhen, bis der Auftriebsbeiwert an der Flügelwurzel den Maximalwert eines einfachen Profils erreicht (siehe Beispiel mit c_{Γ} = 5 in Bild 16). Unter Aufrechterhaltung des Kräftegleichgewichtes[E] bei einem Horizontalflug erreicht man mit einer Drehung von etwa +5 Grad (nur beim Aufschlag, Maximum in Aufschlagmitte) etwa 77 % des Gleitflugauftriebs. Gegenüber dem Verfahren nur mit Flügelverwindung ist das deutlich mehr. Mit einem stark gewölbten Profil nahe der Flügelwurzel und/oder großer Flügeltiefe in diesem Bereich, lässt sich der Auftrieb noch weiter steigern. Nicht umsonst haben Vögeln im Armflügelbereich ein stark gewölbtes Profil, vielleicht mit besonders großem Auftriebsgradienten (d_{ca}/d_{α}).

Durch die Kombination von Flügelverwindung und Drehung der Flügelwurzel kann man also den Auftrieb beim Aufschlag steigern. Das funktioniert aber nur bei mäßigem Schubbedarf bzw. mit relativ hohem zusätzlichem Widerstand.

[E] geänderte Werte für das Kräftegleichgewicht im Rechenprogramm „Orni 1“: Aufschlag Zirkulationskennzahl $c_{\Gamma 1}$ = 5,0 ; Aufschlag Zirkulationsfaktor $k_{\Gamma 1}$ = 0,772; Abschlag Zirkulationskennzahl $c_{\Gamma 2}$ = 8,975 ; Geschwindigkeitsfaktor k_V = 0,980

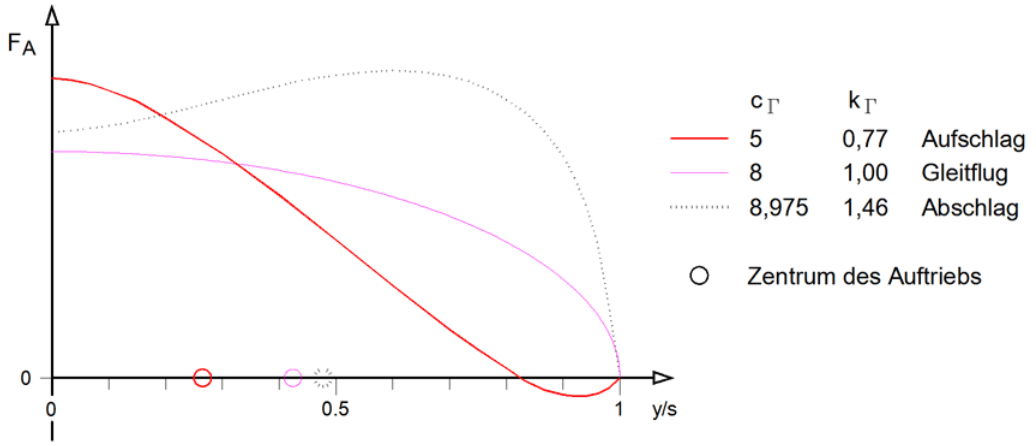


Bild 16 Grobe Annäherung an einen konstanten Auftrieb beim Schlagflug, durch einen Aufschlag mit $c_\Gamma = 5$ und einer Erhöhung des Einstellwinkels an der Flügelwurzel um +5 Grad.

Ein Anstieg des Anstellwinkels an der Flügelwurzel wirkt sich bei verwindungsweichen Flügeln insbesondere im Nahbereich aus, also am Armflügel. Außen gibt ja der Anstellwinkel dem steigenden Auftrieb etwas nach. Bei der Konstruktion des Flügels sollte aber eine Flügelwurzeldrehung immer berücksichtigt werden. Die Verwindung beim Aufschlag kann dann entsprechend kleiner sein.

6.2 Auftrieb in den Schlagendlagen

Als markantes Zwischenstadium zwischen Auf- und Abschlag kann man insbesondere für Berechnungen, für die beiden Schlagendlagen noch eine mittlere Auftriebsverteilung angeben. Dafür eignet sich die Auftriebsverteilung des Gleitflugs. Das erscheint plausibel, da zumindest ein gerader Schlagflügel eines Ornithopters zwischen den beiden Schlagrichtungen kurzzeitig zum Stillstand kommt. Gleichzeitig ist die Gleitflugsituation in den Diagrammen eine gute Orientierungshilfe zur Beurteilung der Veränderungen am Schlagflügel. Bei Ornithoptern wird die Gleitflugsituation in der Endlage aber mit einer elliptischen Auftriebsverteilung nicht immer richtig beschrieben. Das ist nur eine erste Näherung. Auch eine Verteilung mit z. B. $c_\Gamma = 7$ (vielleicht wie gutgleitende Seevögel) bringt beim Gleitflug sehr gute Ergebnisse.

Die Flügelverwindung der Vögel ist durch die Anatomie bei gestrecktem Flügel in der Gleitflugstellung fixiert (siehe Kapitel 8). Ändert sich mit der Abschlagbewegung die Anströmrichtung, so gibt die Flügelverwindung jedoch elastisch nach. Auch mit Muskelkraft sind kleine Änderungen der Verwindung noch möglich. Aber in der oberen Schlagendlage, im kurzen Moment des Flügelstillstands, wenn der Handflügel die gestreckte Flügelstellung erreicht hat, liegt in der Regel wohl auch bei Vögeln etwa die Auftriebsverteilung des Gleitflugs vor.

In der unteren Schlagendlage ist die Situation bei Vögeln nicht ganz so eindeutig. Die Schwenk- und Abwinkelbewegungen des Handflügels haben dort meist schon eingesetzt. Man kann aber davon ausgehen, dass kurz vor Erreichen der unteren Schlagendlage die Flügel noch gestreckt sind und die Abschlagbewegung schon sehr klein ist. Auch in diesem Fall ist dann annähernd die Gleitflugsituation gegeben. Auch bei Vögeln kann man also die Flügelendlagen näherungsweise mit dem Gleitflugzustand beschreiben.

Für den Übergang des Auftriebs zwischen den beiden Takten ist interessant, dass bei großen Vögeln im Reiseflug manchmal eine leichte Pendelbewegung des Anstellwinkels vom Vogelkörper zu sehen ist. Sein Auftrieb, den er zusammen mit dem Schwanz erzeugt, wird dabei variiert. Da die Flügelwurzeln auf beiden Seiten des Körpers diese Pendelbewegung mitmachen, ändert sich synchron auch deren Anstellwinkel. Näherungsweise liegt das Minimum des Anstellwinkels bei der oberen und das Maximum bei der unteren Schlagendlage.

Das folgende Bild 17 wurde von der Zeitlupenaufnahme einer Graugans hergestellt. Das rote Bild zeigt den Vogel in der oberen und das blaue Bild in der unteren Schlagendlage. Beide Bilder wurden auf das Auge der Graugans zueinander ausgerichtet. Wie man sieht, bleiben Kopf und Schwanz praktisch auf der jeweils gleichen Höhe, während der Nacken und die Brust sich deutlich auf- und ab bewegen. Folglich ändert sich der Anstellwinkel des Körpers.

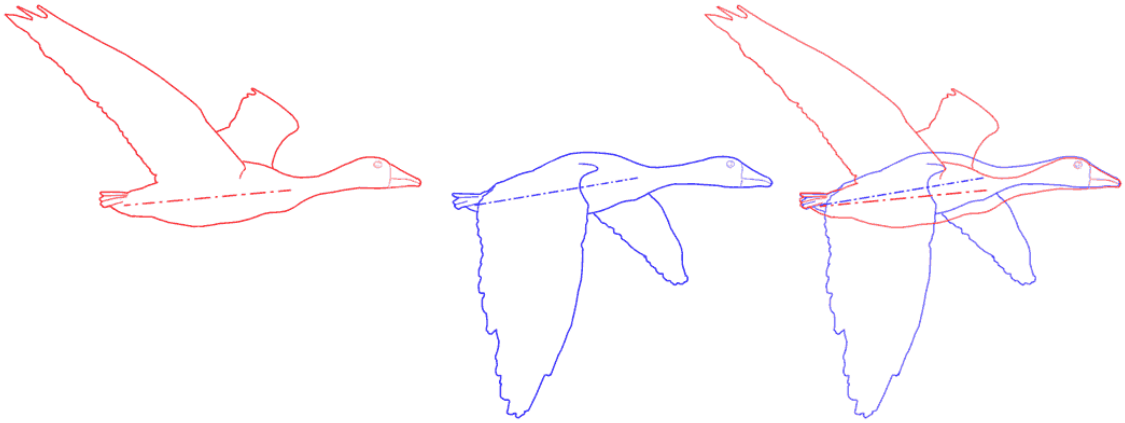


Bild 17 Nicken bzw. Pendeln des Körpers einer Graugans
mit Darstellung der Körperachsen
Zeichnung auf der Grundlage einer Zeitlupenaufnahme von Lloyd Buck[8]

Bei der Suche nach Änderungen des Anstellwinkels an der Flügelwurzel, darf man also nicht nach Bewegungen der Flügelhinterkante gegenüber dem Vogelkörper suchen. Dort findet praktisch keine Relativbewegung statt. Auch die Lage der Flügelvorderkante gegenüber dem Vogelkörper ändert sich nicht. Man muss versuchen, die Mittellinie des Vogelkörpers zu bestimmen. Am besten wären aber Videos genau von vorne, bei denen

man die Höhenlage von Vorder- und Hinterkante des Flügels direkt vergleichen kann (siehe hierzu Bild 19 und Bild 25 und die Animationen von Vögeln, nach Filmen von A. Piskorsch[9]). Die Mittellinie des Vogelkörpers zu schätzen ist nur eine Behelfslösung.

Der erhöhte Anstellwinkel am Beginn des Aufschlags führt zu einem größeren Auftrieb an der Flügelwurzel. Das ist ein Indiz dafür, dass Vögel zu diesem Zeitpunkt für den Aufschlag bereits einen wesentlichen Teil vom Auftrieb des Abschlags zur Flügelwurzel verlagert haben. An dieser Stelle falten Vögel oft auch schon den Handflügel zusammen. Umgekehrt lässt die Auftriebsreduzierung an der Flügelwurzel im Bereich der oberen Schlagendlage den Schluss zu, dass in Spannweitenmitte ein wesentlicher Teil des Auftriebs vom Aufschlag schon abgebaut und in Richtung Flügelspitze verlagert wurde, zumindest bis in den Armflügel. In beiden Fällen müssen die dazugehörigen Verlagerungen des Auftriebs längs des Flügels durch dort stattfindende Anstellwinkeländerungen erfolgen.

Die Pendelbewegung des Vogelkörpers wird durch Vor- und Rückverlagerung des Auftriebszentrums gegenüber dem Schwerpunkt erzeugt. Dies geschieht zum Teil automatisch. Bei gewölbten Flügelprofilen verlagert sich ja der Auftrieb bei großen Anstellwinkeln nach vorne und bei kleinen Anstellwinkeln nach hinten. Außerdem spielen die Flügelpfeilung bzw. das Schwenken der Handflügel nach hinten (siehe Kapitel 8), die Neigung der Schlagebene (siehe Kapitel 9) und das Trägheitsmoment des Rumpfes dabei eine Rolle. Daneben wirken auch noch nach vorne oder hinten gerichtete Kräfte nahe der Flügelspitze im Bereich der Schlagendlagen mit (siehe hierzu Handbuch[7] „Wie Ornithopter fliegen“, Bild A 14). Das Rumpfpendeln ist also ein sehr komplexer Vorgang.

Die Nickbewegung kommt etwa in den Schlagendlagen zum Stillstand. Demnach ist etwa in Schlagmitte die Nickgeschwindigkeit am größten. Auf diese Weise wird beim Aufschlag, infolge der Nickbewegung nach unten, der Anströmwinkel an der Flügelvorderkante vergrößert. Dadurch wird der Auftrieb auch noch in diesem Zeitbereich etwas hochgehalten. Beim Abschlag kehrt sich das um. Beides ist im Sinne der Auftriebsverlagerung positiv zu bewerten.

Die Drehachse der Nickbewegung bei der Gans in Bild 17 liegt nahe der Flügelhinterkante. Alternativ dazu könnte zur Vergrößerung des Anstellwinkels auch die Drehachse weiter nach vorne verlegt werden. Dabei würde sich aber womöglich eine Tendenz zur Umströmung der Flügelhinterkante in Richtung Flügeloberseite einstellen (siehe Bild 18). Dies führte dann zu einer kleinen, kurzzeitigen Ablösung der Strömung auf der Flügeloberseite.

Bild 18 Mögliche Tendenz zur Umströmung der Profil-Hinterkante bei schneller Vergrößerung des Anstellwinkels um eine weit vorne liegende Drehachse.

Aus der Aerodynamik ist mir so ein Strömungsverhalten jedoch nicht bekannt. Dort ändert sich der Auftrieb nahezu unverzögert mit der Änderung des Anstellwinkels (bei nicht beschriebener Lage der Drehachse). Vielleicht steckt ja das Unbekannte in dem Wörtchen „nahezu“. Das Vorbild aus der Biologie zeigt jedenfalls die Drehachse des Gänseflügels an seiner Hinterkante und das ist sicherlich kein Zufall.

Diese Anordnung der Drehachse bedeutet bei jedem Flügelschlag eine Auf- und Abbewegung der Körpermasse. Ihr Anheben ist mit Arbeit verbunden. Der Vogel kann aber Höhe durch Gleiten in Schub umwandeln. Es könnte sein, dass beim Aufschlag der Auftrieb nicht groß genug gemacht werden kann, weil gerade viel Schub benötigt wird. Der fehlende Auftrieb muss dann zwangsläufig beim Abschlag durch größeren Auftrieb ausgeglichen werden. Die daraus resultierende Auf- und Abbewegung der Körpermasse wird in diesem Fall genutzt, um auch noch einen kleinen aerodynamischen Vorteil zu erzielen.

6.3 Flügelbewegungen bei einem Schwan

Etwas anders sieht die Drehung der Flügelwurzel aus, wenn man die Bilder von einem Schwan aus einer Filmaufnahme von A. Piskorsch[9] auswertet (siehe folgendes Bild 19 und Bild 25). Leider ist das Bildmaterial etwas unscharf und das Ergebnis entsprechend ungenau.

Bild 19 Schwan von vorne, aus einer Filmaufnahme von A. Piskorsch[9]

In folgendem Bild 20 wurde das Ende des Aufschlags auf den Beginn der Abschlagbewegung des Armflügels festgelegt (siehe Verlauf des Schlagwinkels Φ). Die Aufschlagbewegung des Handflügels ist dort praktisch abgeschlossen (siehe Verlauf der

Abwinklung δ). In diesem Bild zeigt die Zu- und Abnahme des Anstellwinkels α sehr schön den zeitlichen Ablauf der Auftriebsverlagerung zwischen Flügel und Spannweitenmitte.

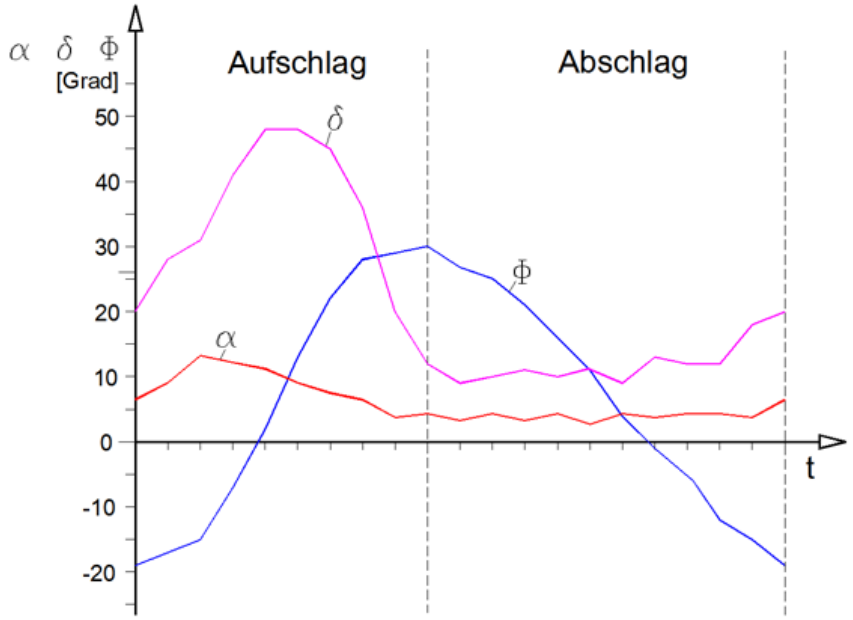


Bild 20 Flügelstellungen während einer Schlagperiode eines Schwanes im Reiseflug nach einer Filmaufnahme von A. Piskorsch[9]

Φ Schlagwinkel des Armflügels gegenüber der Horizontalen

δ Abwinklung des Handflügels gegenüber dem Armflügel

α Anstellwinkel[F] an der Flügelwurzel

Das Taktzeitverhältnis deutet darauf hin, dass der Vogel alles daran setzt, um genügend Auftrieb zu erzeugen.

Das Maximum des Anstellwinkels α liegt in diesem Falle nicht wie bei der Gans in der unteren Schlagendlage vor, sondern in der ersten Hälfte des Aufschlags. Es wird zusammen mit der Abwinklung δ des Handflügels in der Anfangsphase der Aufschlagbewegung aufgebaut. Der Anstieg beginnt bereits gegen Ende des Abschlags. Ein ausgeprägtes Minimum, wie bei der Gans in Bild 17, ist in der oberen Schlagendlage nicht zu sehen. In dieser Flügelstellung besteht eher ein Anstellwinkel wie er vielleicht auch im Gleitflug vorliegt. Er ist dort über längere Zeit nahezu konstant. Wenn man aber diesen niedrigen, wenn auch über längere Zeit konstante Anstellwinkel gleichzeitig als Minimum betrachtet, sind die beiden genannten Fälle von Gans und Schwan aber gar nicht so unterschiedlich.

[F] Genau genommen muss man zu diesem Anstellwinkel noch ein paar Grad dazuzählen, da die Filmaufnahme von einer Brücke, also von oben aufgenommen wurde.

In Bild 20 ist der Anstellwinkel an der Flügelwurzel insbesondere während der Bewegung des Armflügels nach oben erhöht. In dieser Zeit wird der Auftrieb im Wesentlichen nur noch im Armflügel, also in einer Teillänge des Flügels erzeugt. Man kann daher die Drehung der Flügelwurzel auch als eine Maßnahme zur Konstanthaltung des Auftriebs ansehen. Der vergrößerte Auftrieb wirkt jedoch im Windradmodus. Infolge der starken Konzentration des Auftriebs nahe am Körper bzw. wegen dem kleinen Hebelarm der Kraft, ist die Arbeitsleistung aber gering. Der zusätzliche Widerstand bleibt also trotz großem Auftrieb klein.

Die Abwinklung δ des Handflügels gegenüber dem Armflügel geht hier beim Abschlag nicht auf null zurück. Dies liegt an der Art der Bildauswertung. Der Flügel des Schwans ist auch beim Abschlag längs der ganzen Halbspannweite nach unten gekrümmt. Arm- und Handflügel wurden jeweils durch gerade Striche ersetzt. Auf diese Weise bleibt beim Abschlag eine Abwinklung von etwa 10 Grad bestehen. Man sollte eigentlich den gesamten Verlauf der Abwinklung im Diagramm um 10 Grad nach unten verschieben. Die maximale Abwinklung beträgt dann nur noch 40 Grad. Vermutlich befindet sich der Schwan in einer Beschleunigungsphase, vielleicht nach einem Start. Im unbeschleunigten Reiseflug ist die Abwinklung nur etwa halb so groß.

Bemerkenswert ist, dass die Abwinklung des Handflügels schon weit vor der Beendigung des Armflügelabschlags beginnt. Der Grund dafür liegt zum Teil im Nachlassen der Auftriebskräfte im äußeren Flügelbereich. Der Handflügel federt dabei elastisch ein paar Grade nach unten. Darüber hinaus lässt sich aber auch nicht ganz auszuschließen, dass die Abwinklung des Handflügels, zumindest am Anfang, mit Muskelkraft erfolgt. Auf Grund der schwachen Muskeln zur Bewegung des Handflügels (K. Herzog[12]) ist das aber sehr unwahrscheinlich.

Nach seiner Aufschlagbewegung legt der Armflügel oben eine Pause ein. Es ist eine Art Übergangsphase. Nur der Handflügel bewegt sich noch nach oben. Zum Schluss, in der ausgestreckten Handflügelstellung, ist die Flügelverwindung mechanisch fest vorgegeben (siehe Kapitel 8). Ohne Abschlagbewegung des ganzen Flügels ist sie dann wie im Gleitflug. Auf diese Weise wird in der Übergangsphase mit der relativ kraftlosen Aufschlagbewegung des Handflügels der Auftrieb in den äußeren Flügelbereich verlagert und so der Abschlag vorbereitet.

6.4 Phasenverschiebung der Auftriebsverlagerung an der Flügelwurzel

Betrachtet man nur den Schlagwinkel Φ und die Größe des Auftriebs in Form des Anstellwinkels α, so hat man den Eindruck, dass beide Größen sich nicht entsprechend dem gewohnten Bild 10 verhalten. Sie scheinen fast unabhängig voneinander zu verlaufen (siehe folgendes Bild 21). Die Versatzzeiten der markanten Eckwerte dieser Verteilungen weisen aber alle in die gleiche Richtung. Der Beginn der Auftriebsvergrößerung eilt dem Beginn der Aufschlagbewegung des Armflügels um die Zeit $\varphi^{*)}$ voraus. Das Auftriebsmaximum liegt um die Zeitspanne φ noch vor der Mitte der Armflügelbewegung. Auch das Ende der Auftriebsvergrößerung ist etwa um die gleiche Zeitspanne $\varphi^{**)}$ vorgezogen. Man kann daher beim Aufschlag auch von einer Phasenverschiebung φ zwischen Schlagbewegung und der Auftriebsverlagerung an der Flügelwurzel sprechen.

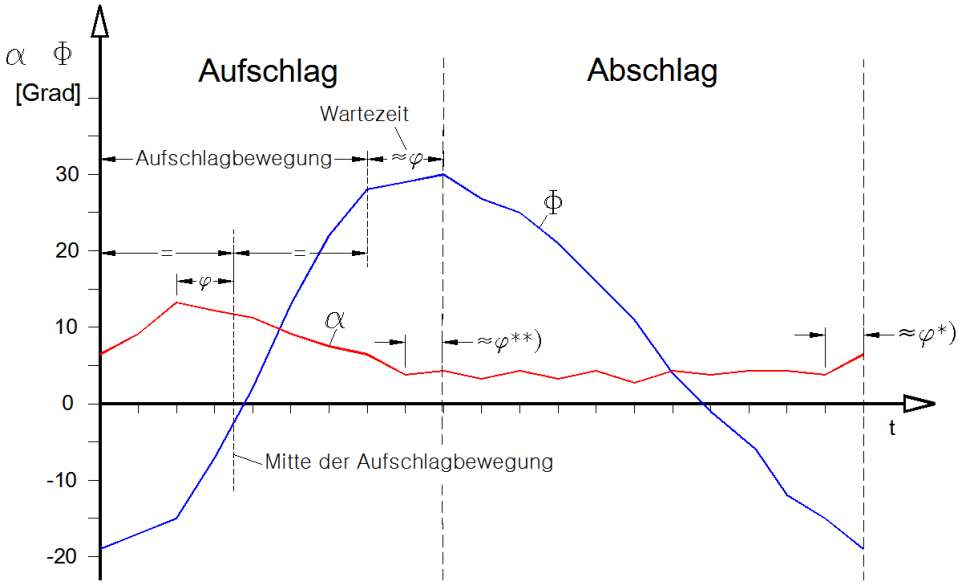


Bild 21 Phasenverschiebung φ zwischen der Auftriebsvergrößerung an der Flügelwurzel und dem Schlagwinkel des Armflügels

Φ	Schlagwinkel des Armflügels gegenüber der Horizontalen
α	Anstellwinkel an der Flügelwurzel und des Vogelkörpers
$^{*)}$	um φ vorverlegter Beginn der Auftriebsverlagerung
$^{**)}$	um φ vorgezogenes Ende des Auftriebsverlagerung

Am Ende der Aufschlagbewegung des Armflügels legt dieser eine Wartezeit ($\approx\varphi$) ein. In dieser Phase des Übergangs zur gestreckten Flügelstellung (δ) wird Auftrieb vom Armflügel in den Handflügel verlagert. Gleichzeitig wird die Auftriebsverlagerung (α)

aus der Spannweitenmitte beendet. Anschließend kann beim Abschlag die Auftriebsverlagerung innerhalb des Flügels wieder abhängig von der Schlagbewegung ablaufen.

Der Aufbau des Auftriebs in Spannweitenmitte lässt sich an Hand der Drehung der Flügelwurzel recht konkret beschreiben. Gleichzeitig sollte aber nach der bisher üblichen Theorie ein Abbau des Auftriebs im äußeren Flügelbereich erfolgen. Stattdessen sieht man bei den einzelnen Bildern des Schwans, wie die Flügelabwinklung schon gegen Ende des Abschlags beginnt, noch während die Schwungfedern leicht nach oben gebogen sind (siehe Bild 25). In der unteren Schlagendlage liegt also an der Flügelwurzel und im äußeren Flügelbereich gleichzeitig deutlicher Auftrieb vor. Das ist noch etwas ungewohnt. Außerdem ist dann womöglich doch der Einsatz von Muskelarbeit erforderlich.

Bei der Beurteilung der Phasenverschiebung ist zu berücksichtigen, dass in dem zugrunde liegenden Diagramm (Bild 20) einfach die Zeitpunkte der einzelnen Filmbilder verwendet wurden. Außerdem gibt es bisher nur das eine, etwas unscharfe Bildmaterial für den Nachweis der Phasenverschiebung.

Es sieht so aus, als ob die Phasenverschiebung der Auftriebsverlagerung vom Schwan praktiziert wird, um im Bereich der unteren Schlagendlage einen großen Auftrieb zu erzielen. Der Auftrieb wird ja frühzeitig in der Spannweitenmitte aufgebaut, im äußeren Flügelbereich aber erst verzögert abgebaut. Der Auftrieb kann so bei noch nicht abgewinkeltem Handflügel in Spannweitenmitte konzentriert werden. Die Geschwindigkeit der Aufschlagbewegung ist dabei noch gering. Im Bereich der oberen Schlagendlage wird der Auftrieb hauptsächlich während der Wartezeit des Armflügels in den äußeren Flügelbereich verlagert, also praktisch ohne Aufschlagbewegung des Armflügels. In beiden Zeitabschnitten des Aufschlags wird also deutlicher Auftrieb mit sehr wenig zusätzlichem Widerstand erzeugt.

Die Abnahme des Auftriebs im äußeren Flügelbereich dauert nahe der unteren Schlagendlage relativ lange. Der Aufschlag beginnt ja, noch während die Schwungfedern leicht nach oben gebogen sind. Trotzdem ist es möglich, dass bei Beginn des Aufschlags, zum Zeitpunkt des maximalen Auftriebs in Spannweitenmitte (Bild 21), schon viel Auftrieb längs des Flügels in Richtung Flügelwurzel verlagert worden ist. Damit liegt dann zu diesem Zeitpunkt im äußeren, abgewinkelten Flügelbereich bereits negativer oder zumindest sehr wenig Auftrieb vor. Auf diese Weise wird relativ frühzeitig die Abwinklung des Handflügels durch die Veränderung seiner aerodynamischen Kräfte unterstützt.

Die Verlagerung des Auftriebs im Bereich der Schlagendlagen braucht einfach ihre Zeit.

6.5 Ausgleich der Trägheitskraft des Flügels

Ein möglicher Grund für die oben genannte Phasenverschiebung der Auftriebsverlagerung, ist der Ausgleich der Trägheitskraft des Flügels. Sie ergibt sich infolge der Änderung der Schlag- bzw. Winkelgeschwindigkeit der Flügelmasse. Beim Bremsen der Masse wirkt die Trägheitskraft in, und beim Beschleunigen entgegen der Bewegungsrichtung. Die maximale Trägheitskraft liegt direkt in der Endlage vor (siehe den Verlauf der Beschleunigung α_B in Bild 10 und Bild 22).

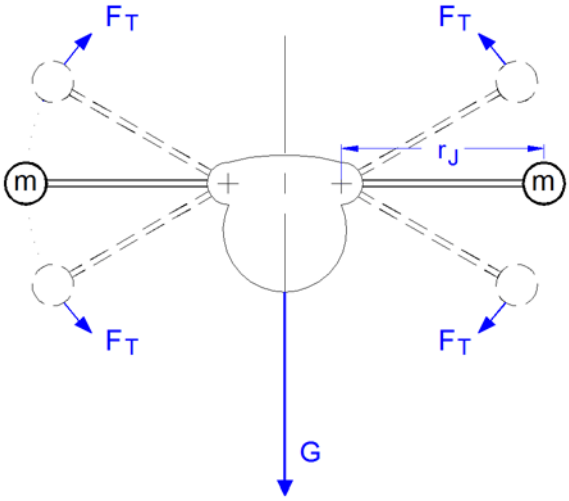


Bild 22 Konzentration der Masse einer Flügelhälfte "m" am Trägheitsradius r_J und ihre Trägheitskraft F_T in den Endlagen. Der Trägheitsradius des Schlagflügels ist der Abstand von der Drehachse, den seine gesammte Masse unter Beibehaltung des Massenträgheitsmoments nach der Konzentration hat.

Eine Möglichkeit zur Reduktion der Trägheitskraft ist die gelenkige Verbindung von Arm und Handflügel. Infolge der kurzen Teillängen von Arm- und Handflügel, sind deren Trägheitsradien und ihre Massen entsprechend kleiner. Beides zusammen wirkt sich sehr stark auf das Trägheitsmoment der beiden Flügelteile aus. Bei der Beschleunigung des Armflügels kann man zwar die daran hängende Handflügelmasse nicht ganz vernachlässigen. Trotzdem bleibt eine deutliche Reduzierung des Schlagflügel-Trägheitsmoments. Die beiden Flügelabschnitte erreichen die obere Endlage auch nicht gleichzeitig, sondern erst nacheinander.

Im Bereich der oberen Endlage wirkt sich die Trägheitskraft am Ende des Flügelaufschlags wie eine Auftriebsvergrößerung aus. Der aerodynamische Auftrieb könnte entsprechend angepasst werden, muss aber nicht. Der zusätzliche Auftrieb schadet ja

nicht. Das Schlagmoment der Massenträgheit sollte aber bei der Materialfestigkeit des Flügels berücksichtigt werden.

Umgekehrt wirkt die Trägheitskraft am Trägheitsradius im Bereich der unteren Endlage wie ein zusätzliches Gewicht. Das gilt aber nur, wenn dort die Flügelmasse durch die Antriebsmechanik, also aus dem Inneren des Ornithopters heraus abgebremst wird (z.B. durch eine Endlagenfeder). Erfolgt dagegen die Abbremsung von außen, also durch den aerodynamischen Auftrieb am Flügel, so entsteht kein zusätzliches Gewicht. Es ist also sehr vorteilhaft die Trägheitskraft im Bereich der unteren Schlagendlage durch Auftrieb auszugleichen. Der muss aber ausreichend groß sein und sollte daraufhin überprüft werden.

Der Anteil der maximalen Trägheitskraft beim Ornithopter im Rechenprogramm „Orni 1“[4], liegt bei ±70 % des Gleitflugauftriebs. Der Auftrieb in der Endlage in der Größe des Gleitflugauftriebs reicht also bei sinusförmigem Bewegungsablauf aus, um den Flügel in der unteren Endlage ohne „Gewichtszunahme“ zu bremsen. Die Trägheitskraft ist in diesem Fall relativ groß. Es wird aber auch mit einer gleichmäßigen Gewichtsverteilung längs des ganzen Flügels gerechnet. Viele Schlagflügelkonstruktionen werden einen kleineren Schwerpunktabstand haben. Es ist aber nicht ganz einfach, dafür das zur Berechnung erforderliche Trägheitsmoment zu bestimmen. Im Handbuch[7], Kapitel 5.6[G] wird dazu ein Vorschlag für die Praxis gemacht.

Bei Vögeln ist das Trägheitsmoment deutlich kleiner als bei Ornithoptern. Grundlage dafür sind der kleine Abstand des Flügelschwerpunktes vom Schultergelenk und das geringere Flügelgewicht Trotzdem kann es zu spürbaren Trägheitskräften kommen. Beim Flügelabschlag der Nebelkrähe in Bild 11 spielt sich die Verzögerung bzw. negative Beschleunigung nahe der unteren Schlagendlage erst zwischen den Stellungen 6 und 7 ab. Bei einer Verkürzung von Bremszeit und Bremsweg steigt aber die Trägheitskraft. Um den Anstieg zu verdeutlichen, ist die Beschreibung der Beschleunigungsarbeit für die Flügelmasse hilfreich. Bei gleichen Ausgangsbedingungen ist die Beschleunigungsarbeit zum Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit immer gleich groß.

[G] Achtung! Im Handbuch muss die Gleichung 5.12 lauten $J_F = \frac{m_F}{3} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2$

Der gleiche Fehler wurde auch im Rechenprogramm „Orni 1“, Version 4.0 korrigiert und außerdem die Berechnung der Trägheitskraft ergänzt.

$$W = F \cdot s$$

W	Beschleunigungsarbeit [Nm]
F	Beschleunigungskraft zur Überwindung der Trägheitskraft [N]
s	Wegstrecke der Beschleunigung [m]

Bei kleiner werdender Wegstrecke der Beschleunigung wächst also die Beschleunigungskraft. Wenn man beispielsweise die Winkel- bzw. Wegstrecke zum Abbremsen der Flügelmasse auf ein Fünftel reduziert, so wächst die Trägheitskraft auf das Fünffache, zumindest bei gleichmäßiger Beschleunigung. Trotzdem ist es unwahrscheinlich, dass in diesem Beispiel bei Vögeln der Gleitflugauftrieb der Endlage zum Abbremsen des Flügels nicht ausreicht. Bei Ornithoptern mit verkürztem Bremsweg der Schlagflügel ist dagegen eine Überprüfung generell empfehlenswert.

Man kann sich die Wirkung der Trägheitskraft auch an sich selber vorspielen. Dazu stellt man sich auf eine Personenwaage, die möglichst eine analoge Anzeige haben sollte, und schlägt mit den Armen auf und ab. An der Anzeige der Waage kann man dann die beschriebenen Veränderungen des eigenen Gewichtes ablesen.

6.6 Drehung der Flügelwurzel bei Ornithoptern

Für Ornithopter wird es nicht ganz einfach, die Nickbewegung des Vogelkörpers nachzubilden. Bei einem langen Hebelarm des Leitwerks ist es aber wahrscheinlich sowieso besser, erst mal mit einer Drehung der Flügelwurzel gegenüber dem Rumpf zu arbeiten. Doch in welchem Zeitraum soll der Anstellwinkel an der Flügelwurzel vergrößert werden. Zumindest bei geraden Schlagflügeln ist es ja nicht erforderlich, eine Abwinklung des Handflügels einzuleiten (siehe Kapitel 7.2).

Die Schwan-Daten von Bild 20 sind genau wie die Graugans-Darstellung in Bild 17, nur Einzelfälle einer nicht näher beschriebenen Flugsituation jeweils einer Vogelart. Es ist also noch unsicher, welcher zeitliche Verlauf des Anstellwinkels an der Flügelwurzel unter welchen Bedingungen der Beste ist. Solange keine Messungen aus einem Windkanal vorliegen, muss man sich wohl durch Experimente dem Optimum nähern. Der Verlauf des Anstellwinkels α in Bild 21 ist aber sicherlich für die Größe und den zeitlichen Ablauf ein guter Anhaltspunkt. Die Auswirkungen der Anstellwinkeländerung an der Flügelwurzel auf die Größe der Flügelverwindung beim Aufschlag sind bei der Konstruktion des Schlagflügels zu beachten. Die Flügelverwindung kann dabei kleiner werden.

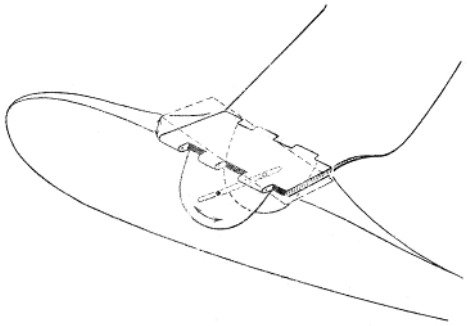


Bild 23 Vorschlag zur Konstruktion einer Flügelwurzeldrehung von Karl Herzog[10], aus seiner Artikelserie „Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik“, Nov. 1963

Bei den Ornithoptern EV1 bis EV5[11] habe ich auch mit einer Drehung der Flügelwurzel gearbeitet (etwa ± 3 Grad). Das Maximum lag in Aufschlag-Mitte und das Minimum in Abschlag-Mitte. Der zeitliche Verlauf war sinusförmig. Beim Abschlag so eine Drehung der Flügelwurzel zu verwenden, war nach heutigem Kenntnisstand falsch oder zumindest war sie zu groß.

7. Abwinklung des Handflügels nach unten

7.1 Abwinklung allgemein

Beim Reiseflug der Vögel bleibt die Abwinklung des Handflügels nach unten zwar relativ klein. Aber auch dabei bietet sie sicher noch einige Vorteile. Sie werden in Folgendem näher beschrieben.

Durch die Endscheibenfunktion des Handflügels wird der Auftrieb im Armflügelbereich zusammengehalten. Dadurch hilft die Abwinklung bei der Konzentration des Auftriebs in Spannweitenmitte und damit bei der Schuberzeugung. Das lohnt sich aber nur, wenn dort auch tatsächlich großer Auftrieb vorliegt. Ohne kräftigen Auftrieb im Armflügelbereich und ohne starken Auftriebsunterschied längs der Halbspannweite ist eine starke Abwinklung wenig sinnvoll.

Infolge der Abwinklung ändert sich die Richtung der Auftriebskraft am Handflügel. Die Kräfte auf beiden Flügelseiten des Vogels gleichen sich dabei teilweise gegenseitig aus. Der wirksame Auftrieb in der senkrechten Richtung wird dadurch kleiner (siehe Bild 24). Bei dem meistens vorkommenden, negativen Auftrieb ist das vorteilhaft, bei positivem Auftrieb nachteilig.

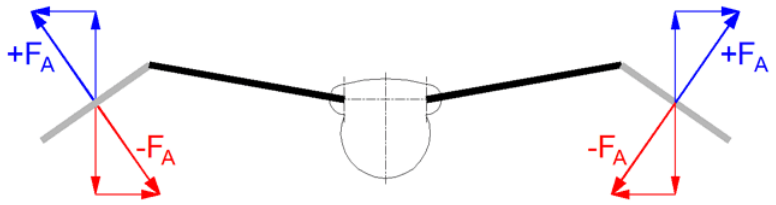


Bild 24 Richtung der Auftriebskräfte am Handflügel bei seiner Abwinklung
blau bei positivem Auftrieb
rot bei negativem Auftrieb

Mit der Abwinklung des Handflügels wird auch sein Schwerpunktabstand vom Schlaglager des Flügels kleiner. Das gilt auch für das Zentrum seines Auftriebs. Zusammen mit der eben beschriebenen Reduktion der Auftriebswirkung wirkt sich das auch auf die Windradfunktion des Schlagflügels aus. Deren Einfluss nimmt ab (für das Bremsen der Aufschlagbewegung muss das nicht immer vorteilhaft sein). Das trifft auch für die Trägheitskraft des Flügels in der oberen Endlage zu (siehe Kapitel 6.5). Damit verringert sich bei Abwinklung des Handflügels die Notwendigkeit zum Einsatz von Energiespeichern (Kapitel 10).

Die Konzeption von Schlagflügeln kann man optimieren, wenn man die vielen Bewegungen der einzelnen Flügelteile selbsttätig ablaufen lässt. Die hier angesprochene Abwinklung des Handflügels kann man sehr vorteilhaft mechanisch mit der Verwindung des Armflügels koppeln (je größer die Abwinklung umso größer die Verwindung des Armflügels). Vögel funktionieren partiell sicherlich auch auf diese Weise. Die Abwinklung wiederum kann durch aerodynamische Kräfte angetrieben werden. Bei den Ornithoptern[11] EV6 bis EV8 wurde dafür die Verlagerung des Auftriebs zwischen Arm- und Handflügel genutzt (Abwinklung nur ± 3 Grad). Für eine stärkere Schuberzeugung sollte aber die Abwinklung beim Aufschlag deutlich größer gemacht werden.

Für den Reiseflug von Ornithoptern zwangsweise eine starke Flügelabwinklung mechanisch vorzugeben erscheint eher nachteilig. Aber schon mit einer kleinen Flügelabwinklung sieht das Flugbild langsam schlagender Ornithopter wunderschön aus. Es gleicht dann etwas den großartigen Vorbildern.

7.2 Abwinklung während des Aufschlags

Ein Verfahren zur Einleitung der Abwinklung des Handflügels ist in folgendem Bild 25 von einem Schwan erkennbar. Es zeigt auf der linken Seite den Flügel in der unteren Endlage und auf der rechten Seite den Flügel eine ganze Weile nach Beginn des Armflügelaufschlags (am zweiter Zeitpunkt auf der Zeitachse in Bild 20). Der Anstellwinkel

im Bild rechts ist wesentlich größer als im Bild links. Die Federspitzen in Bild 25b sind immer noch leicht nach oben gebogen.

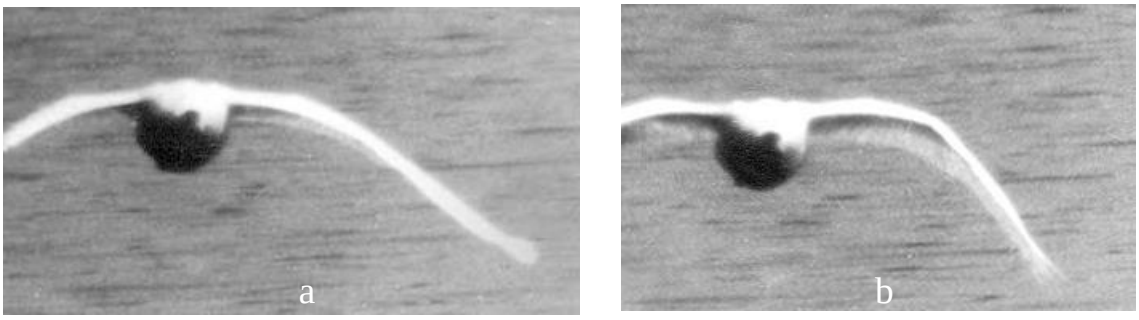


Bild 25 Anfang der Abwinklung des Handflügels durch verstärkten Auftrieb am Armflügel, aus einer Filmaufnahme von A. Piskorsch[9]

Die Abwinkelbewegung des Handflügels kann sich bei gelenkig verbundenen Arm- und Handflügel selbsttätig einstellen. Dazu muss nur im Armflügelbereich starker Auftrieb vorliegen. Ein deutlich kleinerer Auftrieb im Handflügelbereich stört bei dieser Methode kaum. Im Gegenteil, der Handflügel tendiert durch die Aufwärtsbewegung des Armflügels zu einer Drehung um seinen Schwerpunkt. Die Flügelspitze wird dabei nach innen geschlagen und erzeugt nahe der Spitze sogar noch ein wenig Schub. Eine Mitwirkung von Muskelkraft ist dabei eher unwahrscheinlich. Bei Vögeln ist die Aufgabe die Flügelabwinklung einzuleiten, neben der Auftriebserzeugung, sicherlich ein wichtiger Grund für die frühe Vergrößerung des Auftriebs an der Flügelwurzel.

Beim Aufschlag mit gestreckten Flügeln gelten die Auftriebsverteilungen von Bild 8 und gemäß Kapitel 6.1 insbesondere die mit $c_\Gamma = 5$. Welche Auftriebsverteilungen bei abwinkelbaren Handflügeln zweckmäßig sind, ist unbekannt. Man wird aber bestrebt sein, während des ganzen Aufschlags die in der unteren Endlage eingeleitete Abwinklung beizubehalten. Solange keine Versuche und Messungen im Windkanal möglich sind, muss man sich wohl nach der Methode von Versuch und Irrtum an geeignete Anstellwinkel herantasten.

Bei ausreichend negativem Auftrieb weicht ein abwinkelbarer Handflügel der von oben kommenden Anströmung nach unten aus. Der Auftrieb wird dadurch nicht mehr so negativ wie bei einem gestreckter Schlagflügel. Trotzdem ist es ratsam die Abwinklung zu begrenzen. Die Größe der Abwinklung des Handflügels bei Vögeln richtet sich nach dem Schubbedarf bzw. der jeweiligen Schlagfrequenz.

Bei Ornithoptern kann man eine ähnlich flexible Begrenzung der Abwinklung erreichen, wenn man die Achse des Handgelenks hinten leicht nach innen neigt (siehe

Bild 26). Dadurch wächst der Anstellwinkel des Handflügels während der Abwinklung an und der dadurch ansteigende Auftrieb bremst diese Bewegung. Wenn der Handflügel beispielsweise um 90 Grad nach unten abgewinkelt ist, ist sein Anstellwinkel um den Winkel λ angewachsen.

Auf diese Weise kommt der Handflügel in einer Zwischenstellung zum Stillstand. Mit der Größe des Zusatzwinkels λ lässt sich also die Größe der Abwinklung beeinflussen. Außerdem beschleunigt er die Aufwärtsbewegung des Handflügels in der oberen Schlagendlage. Etwa 10 Grad können eine brauchbare Ausgangsbasis für entsprechende Experimente sein.

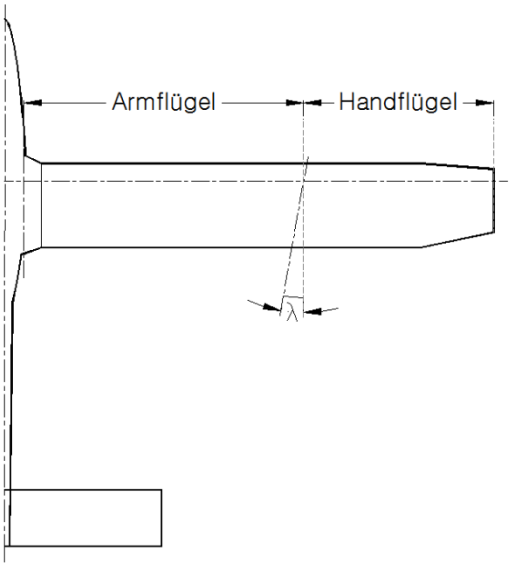


Bild 26 Zusatzwinkel λ (Lambda) des Handgelenks bei einem Ornithopter für einen Anstieg des Handflügelanstellwinkels während der Abwinklung

Eine Konstruktion mit sehr großem Zusatzwinkel zeigt folgendes Bild 27. Sie ersetzt die Flügelverwindung im Unterarm der Vögel durch einen veränderlichen Profilknick entlang der Verwindungsachse (siehe hierzu Bild 29). Während des Aufschlags mit maximalem Profilknick liegt bei dieser Konstruktion gleichzeitig die maximale Abwinklung des Handflügels vor. Man kann sich gut vorstellen, dass in diesem Zustand am äußeren Ende des Unterarms viel Auftrieb angesammelt wird. In der oberen Endlage unterstützt dann dieser Auftrieb durch Druckausgleich den Aufschlag des daneben liegenden Handflügels. Auf diese Weise wird der Auftrieb in Richtung der Flügelspitze verlagert.

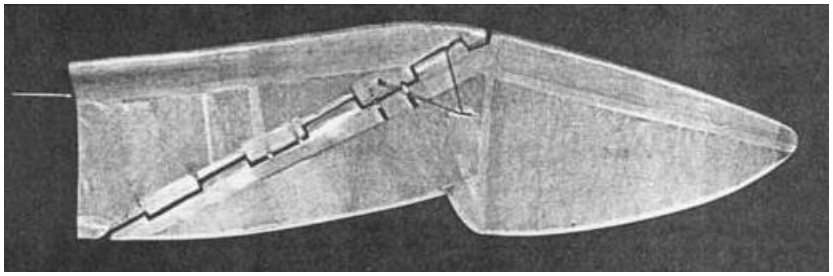


Bild 27 Schlagflügel mit Änderung der Profilwölbung und des Anstellwinkels, insbesondere am Unterarm, bei Abwinklung des Handflügels. Zwei Gummifäden auf der Flügelunterseite unterstützn die Abwinklung. Konstruktion von Karl Herzog[10], 1963

Es sieht manchmal so aus, als ob Vögel die Abwinklung des Handflügels durch Muskelkraft unterstützen, zumindest am Anfang der Bewegung. Bei Ornithoptern lässt sich das durch eine Feder nachbilden, die den Handflügel ein Stück weit nach unten schlagen lässt. K. Herzog hat das mit zwei Gummifäden ausgeführt (siehe Bild 27). Die Stärke der Feder kann man so wählen, dass sie durch die Auftriebskraft im Gleitflug gerade noch vollständig gespannt werden kann. Mögliche Auswirkungen bei der Landung sind zu berücksichtigen. Ein besseres Verfahren für die Abwinklung zeigt aber Bild 25.

7.3 Flügel ausbreiten in der oberen Schlagendlage

Beim Flügelaufschlag mit einer Abwinklung des Handflügels ist klar, dass der Armflügel die obere Schlagendlage eher erreicht als der Handflügel. In Zeitlupenaufnahmen großer Vögel sieht man dann, dass der Armflügel oben wartet bis der Handflügel die gestreckte Flügelstellung erreicht hat (siehe z. B. Bild 21).

Die Wartezeit des Armflügels in der oberen Schlagendlage, mit der darin enthaltenen Aufwärtsbewegung des Handflügels und der Auftriebsverlagerung, ist Teil des Übergangs vom Auf- zum Abschlag. Ohne diese Wartezeit birgt die Abwinklung unter Umständen eine sehr hohe mechanische Belastung.

In folgendem Bild 28 ist links das Bewegungsschema des Handflügels beim Vogel dargestellt. Darin bewegt sich der Handflügel, wie in der Stellung 1 gezeigt, nach oben. Der Armflügel eilt dem Handflügel voraus und erreicht in der Stellung 2 die obere Schlagendlage. Anschließend bleibt der Armflügel in dieser Stellung und wartet, bis auch der Handflügel die obere Endlage 3 erreicht hat. In dieser Zeit wird durch Anstellwinkeländerungen infolge der Handflügelbewegung, Auftrieb in den äußeren Flügelbereich verlagert. Mit der gestreckten Flügelstellung beginnt dann der Abschlag mit voller Schuberzeugung.

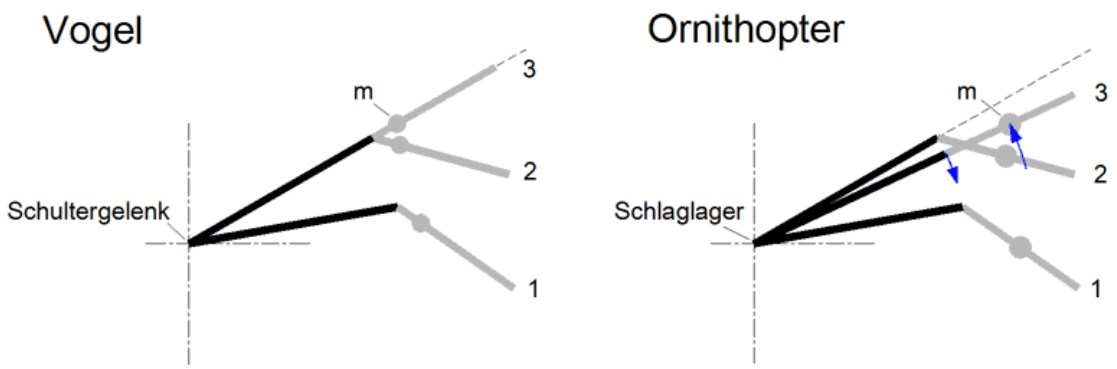


Bild 28 Vergleich des Bewegungsablaufes vom Handflügel im Bereich der oberen Schlagendlage

Bei derzeitigen Ornithopter-Vorschlägen wird in der Regel der Antrieb bei Erreichen der oberen Schlagendlage nicht angehalten. Der Armflügel wartet also nicht, bis der Handflügel ganz oben ist. Außerdem liegt im Gegensatz zum Vogelflügel der Schwerpunkt des Handflügels nicht so nahe am Handgelenk. Dadurch ergibt sich folgendes Szenario, dargestellt auf der rechten Seite von Bild 28.

Der Handflügel bewegt sich, wie in der Stellung 1 dargestellt, nach oben. Der Armflügel eilt dem Handflügel voraus und erreicht in der Stellung 2 die obere Endlage. Der Antrieb führt den Armflügel sofort wieder nach unten. Der Handflügel ist aber noch nach oben in Bewegung. Er erreicht in der Stellung 3 die gestreckte Flügelstellung und schlägt dort mit seiner gegenläufigen Bewegung hart am Anschlag seines Gelenkes an. Gleichzeitig ist die anschlagende Masse des Handflügels ein urplötzliches Hindernis für die Abschlagbewegung des ganzen Flügels. Der weit außen liegende Handflügel muss mit dem Antrieb erst auf die vorherige Abschlaggeschwindigkeit beschleunigt werden. Dazu kommt ein schlagartig anwachsender Auftrieb am Handflügel. Entsprechend groß ist die Stoßbelastung für den Flügelholm und das Getriebe. Erst dann beginnt die volle Schuberzeugung. Die Abwinklung soll den Schub verstärken. Wenn aber der erste Teil des Abschlages kaum Schub erzeugt, wird das Ziel nicht erreicht.

Es gibt mehrere Möglichkeiten das Trägheitsproblem des abgewinkelten Handflügels zu entschärfen:

a) Den Armflügel wie bei den Vögeln oben warten lassen, bis auch der Handflügel oben angelangt ist.
   Dazu vielleicht den Flügel vom Antrieb abkuppeln oder den Antrieb kurzzeitig anhalten. Man kann es auch mit einem Antrieb versuchen, der bei jedem Drehmomentzunahme an der Kurbel immer erst eine Feder spannt, bevor sich die Kurbel weiterdreht.

b) Bei Kurbelantrieben drehzahlgeregelte Antriebe verwenden.
Wegen der Kurbelcharakteristik ist die Kraftanforderung an den Motor im Bereich des Kurbeltotpunktes gering. Außerdem ist der Handflügel dort nicht belastet. Der Antrieb soll im Bereich des Kurbeltotpunktes nicht mit einem Drehzahlanstieg reagieren. Die so verlangsamte Bewegung des Schlagflügels, kombiniert mit dem zeitlich sinusförmigen Verlauf, soll hier die Wartezeit ersetzen.

c) Die Masse des Handflügels klein machen und sie möglichst nahe am Handgelenk konzentrieren.

d) Im Handgelenk einen weichen Anschlag verwenden.
Auch elastische Flügelholme können helfen. Dadurch entstehen allerdings ungewollte Schlagschwingungen.

8. Schwenken des Handflügels nach hinten

Neben der Abwinklung des Handflügels nach unten sieht man bei Vögeln auch eine Schwenkbewegung des Handflügels nach hinten. In der Regel werden beide Abwinklungen gleichzeitig angewendet.

Bei Vögeln ist die Verwindung oder gar Drehung des Handflügels am Handgelenk in der gestreckten Flügelstellung durch die Anatomie[12] stark eingeschränkt (durch Flügelskelett, Sehnen, Randligament zur Aufnahme der Federspulen der Schwungfedern). Ohne Abschlagbewegung liegt dann längs des ganzen Flügels eine Anstellwinkelverteilung wie für den Gleitflug vor. Eine elastische Verwindung des Handflügels, beispielsweise beim Abschlag, ist aber noch möglich und ebenso eine kleine zusätzliche Verwindung durch Muskelkraft. Die Einschränkung der Verwindung wirkt umso stärker, je weiter die Handflügelspitze durch den Schub nach vorne gezogen wird. Erst durch eine zumindest kleine Schwenkbewegung des Handflügels nach hinten wird diese Beschränkung gelockert. Ihr großer Vorteil ist die schnelle und nahezu kraftfreie Einstellung der Flügelverwindung für den Abschlag und den Gleitflug. Außerdem erfolgt bei Vögeln zusammen mit der Schwenkbewegung nach hinten gleichzeitig eine Flächenreduzierung und Zuspitzung des Handflügels durch übereinander Schieben der Schwungfedern.

Mit der Schwenkbewegung des Handflügels nach hinten wird automatisch auch die Länge des Armflügels etwas verkürzt (siehe folgendes Bild 29). Dadurch ändert sich das Flügelprofil am Ellbogen. Vermutlich wird die Lage der maximalen Profildicke, die Profilwölbung und der Anstellwinkel verändert. Auch die Pfeilung des Unterarms ver-

lagert Auftrieb in Richtung der Flügelwurzel. Unter Umständen können diese Veränderungen die Auftriebsverlagerung durch Drehung der Flügelwurzel unterstützen, oder bei geringen Anforderungen sogar ersetzen. Insgesamt wird durch die Formänderung des Flügels das Zentrum des Auftriebs mehr zur Flügelwurzel verlagert. Das ist gut für die Konzentration des Auftriebs in Spannweitenmitte, für Ornithopter aber nur schwer nachzuahmen.

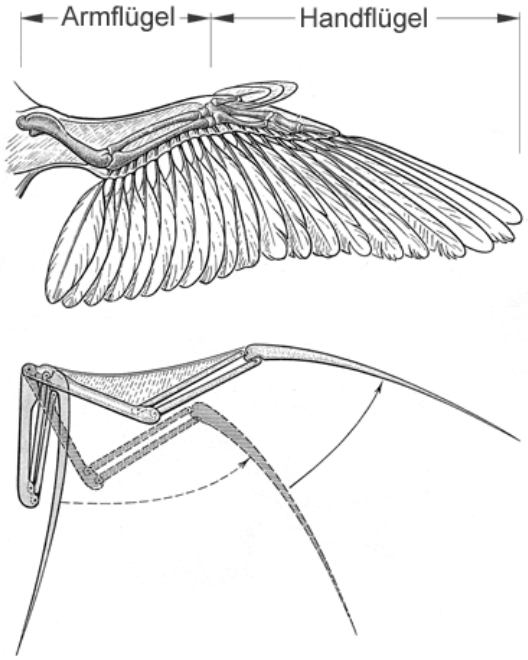


Bild 29
Schwenkbewegung des Vogelflügels, gezeichnet von Karl Herzog

Auch der Flügel als Ganzes führt eine kleine Schwenkbewegung gegenüber dem Körper aus. Der Widerstand beim Aufschlag drückt ihn nach hinten. Der Schub beim Abschlag, insbesondere im äußeren Flügelbereich, zieht ihn nach vorne. Die Schwenkbewegungen des Handflügels und die des ganzen Flügels verlaufen synchron und addieren sich. Eine Bahnlinie der Flügelspitze wie in folgendem Bild 30 täuscht also eine zu große Abwinklung des Handflügels vor, insbesondere nach vorne.

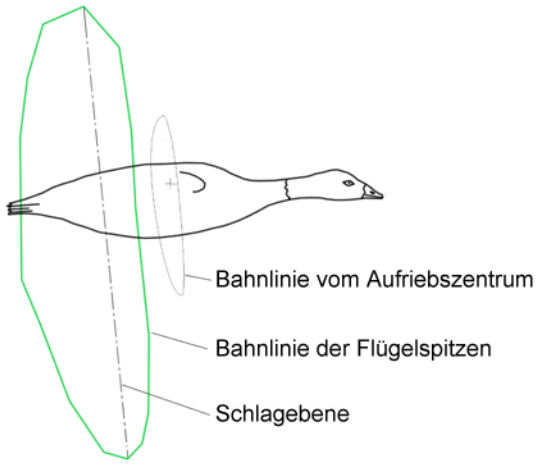


Bild 30
Ringelgans im Reiseflug
mit den Bahnlinien der Flügelspitzen
und des Auftriebszentrums.
Das Auftriebszentrum wurde hier
bei 25 % der Flügelwurzeltiefe
angenommen.

Mit den Schwenkbewegungen des Flügels bewegt sich auch das Zentrum des Auftriebs vor und zurück. Dadurch wird der Vogel während des Flügelaufschlags hinten angehoben. Am Ende des Aufschlags sind dann der Vogelkörper und damit auch die Flügelwurzeln etwas nach unten geneigt (siehe Bild 17). Beim Flügelabschlag, mit seiner Flügelschwenkbewegung und Verlagerung des Auftriebs nach vorne, wird der Vogelkörper dann wieder aufgerichtet.

Solange man die Rumpf-Nickbewegung bei Ornithoptern nicht anwendet, schränkt das den Nutzen der Schwenkbewegung des Handflügels etwas ein. Die Mitwirkung beim Endscheibeneffekt bleibt aber erhalten. Das gilt vermutlich insbesondere dann, wenn eine Zuspitzung am Handflügelende ausgeführt wird. Wie sich allerdings eine starke Pfeilung bzw. die Schräganblasung des Handflügels auf seinen negativen und positiven Auftrieb auswirkt, ist unbekannt.

Vögel nutzen die Schwenkbewegung auch zur Kurvensteuerung. Sie beeinflussen damit insbesondere die Verwindungselastizität des Handflügels. Nach Versuchen durch E. v. Holst[1] funktionier das Kurven beim Schlagflug alleine durch größere oder kleinere Elastizität des Handflügels auf einer Flügelseite. Bei größerer Elastizität auf der angestrebten Kurvenaußenseite ergibt sich dort eine größere Flügelverwindung und die Schlagbewegung geht auf dieser Seite leichter. Der Schlagwinkel wird hier größer und auf der anderen Flügelseite automatisch kleiner. Auf diese Weise wird auf der Kurvenaußenseite der Schub größer und das Kurven beginnt. Durch stärkere Anströmung auf der Kurvenaußenseite erhöht sich dort der Auftrieb und die Flügelseite wird angehoben. Ein Schieben oder Slippen nach außen wird so verhindert. Es kommt also rechts und links zu unterschiedlicher Schlagweite, aber nicht durch unterschiedliche Schlagintensität oder unterschiedliche mechanischen Schlagbewegung. Anstelle der Elastizität des Handflügels kann man für die Kurvensteuerung eines Modells zur Not auch nur das Maximum seiner Verwindung verändern.

Dagegen verwenden Vögel, nach E. v. Holst, zur Kurvensteuerung im Gleitflug häufig das Verkleinern der Flügelfläche auf der Kurven-Innenseite. Das ist ebenfalls nur mit einer Schwenkbewegung des Handflügels nach hinten möglich (mit einseitiger Verlagerung des Auftriebszentrums nach hinten). Durch die dabei größer werdende Elastizität des Handflügels, wird gleichzeitig auch sein Anstellwinkel kleiner. Es lässt sich also gar nicht eindeutig sagen, welche dieser Änderungen für die Steuerung entscheidend ist. Für Ornithopter ist es zunächst leichter, einfach nur die Größe der Verwindung zu beeinflussen.

Auf diese Weise erfolgt die Kurvensteuerung, bei gleicher Flügelschwenkbewegung, beim Schlag- und Gleitflug in die entgegengesetzte Richtung. Das ist für den Fernsteuerpiloten gewöhnungsbedürftig. Darüber hinaus steht aber dem lebenden Vogel noch eine große Fülle anderer Möglichkeiten zur Lage- und Kurssteuerung zur Verfügung. Von Konrad stammt der Satz, dass der Vogel dieselben Steuereffekte stets auf andere Weise erreicht.

Die Lageregelung um die Querachse bzw. die Höhensteuerung ist durch Vor- und Rückverlagerung der Flügelfläche möglich. Das Hauptproblem der Lageregelung ist, die Balance zu halten. Das ist zwar mit Computern lösbar, aber schwierig auszuführen. Ein stabilisierendes Höhenruder wird daher noch eine Weile unverzichtbar bleiben.

9. Neigung der Flügelschlagebene

Die Flügelschlagebene ist eine gedachte Ebene, welche die Flügelachsen während der Schlagbewegung überstreichen. Eine Neigung der Flügelschlagebene kann auf zweierlei Weise erzielt werden. Entweder ist die Neigung der Schlagachse gegenüber der Rumpfachse fest eingestellt oder man neigt im Flug die Rumpfachse gegenüber der Flugrichtung. In letzterem Falle wird die Neigung der Flügelschlagebene sozusagen erflogen. Der Unterschied der beiden Verfahren liegt im Verhalten des Einstellwinkels längs des ganzen Flügels. Bei der erflogenen Neigung der Flügelschlagebene ändert er sich, bei der eingebauten Neigung nicht. In Folgendem wird nur die eingebaute Neigung der Flügelschlagebene betrachtet und kurz als „Neigung“ bezeichnet.

Beim Reiseflug der Vögel ist die Neigung der Schlagebene nicht immer zu sehen. Wenn, wenn dann verläuft sie meist von hinten-oben nach vorne-unten. Wie nachfolgend gezeigt wird, hat das für die Schuberzeugung Vorteile. Die Flügel werden aber nicht nur in der Schlagebene bewegt. Insbesondere außen werden sie beim Abschlag durch den Schub auch nach vorne gezogen und beim Aufschlag durch den Flügelwiderstand nach hinten gedrückt. Das Ergebnis ist eine etwa elliptische Bahnlinie der Flügelspitze, wobei die Längsachse der Ellipse in der Schlagebene liegt (siehe Bild 31).

Ein großer Vorteil der Neigung ist die Zunahme der Anströmgeschwindigkeit beim Abschlag im äußeren Flügelbereich. Die kleine Vorwärtsbewegung der Flügelspitzen addiert sich ja zur Fluggeschwindigkeit. Da der Auftrieb quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt, ist die Neigung durchaus bedeutsam. Sie hilft beim Abschlag, den Auftrieb und damit die Schubkraft im äußeren Flügelbereich zu verstärken. Besonders vorteilhaft ist dabei, dass dazu der Arbeitsbereich des Auftriebsbeiwertes vom Flügel-

profil nicht erweitert werden muss. Beim Aufschlag unterstützt die kleinere Anströmgeschwindigkeit im äußeren Flügelbereich den Abbau des Auftriebs.

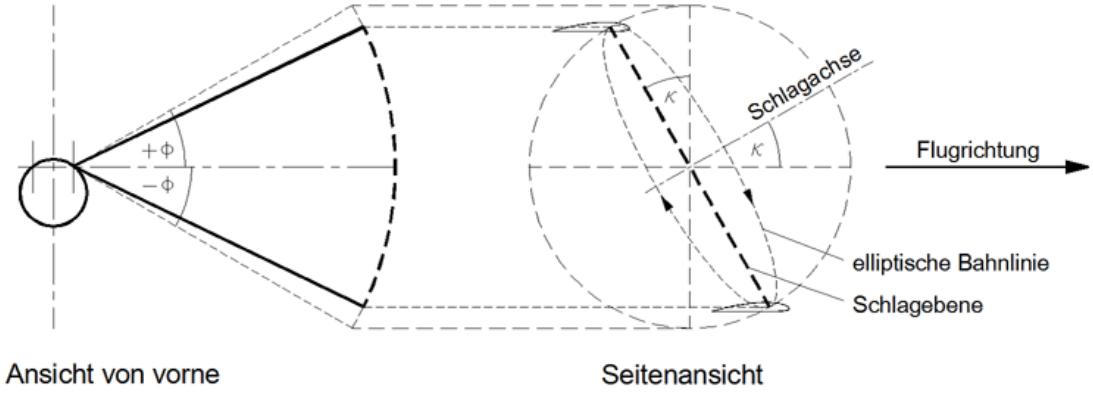


Bild 31 Eingebaute Neigung der Flügelschlagebene durch Kippen der Schlagachse gegenüber der Rumpfachse

Die Neigung hilft also bei der Verlagerung des Auftriebs längs der Spannweite und damit bei der Schuberzeugung. Mit größer werdender Neigung verringert sich allerdings immer mehr die Auf- und Abbewegung des Flügels (siehe Bild 31). Das geht zu Lasten der Schuberzeugung. Wie die Berechnung bei einem großen Ornithoptermodell zeigte, liegt ein schwach ausgeprägtes Steigflug-Optimum bei einer Neigung von etwa 10 Grad. Gleichzeitig liegt dort aber ein Minimum für den Streckenflug vor (siehe Handbuch[7] „Wie Ornithopter fliegen“, Kapitel 8.8, Bild 8.13).

10. Energiespeicherung mit Federn

Ein erster Hinweis zur Speicherung der Aufschlagenergie bei technischen Fluggeräten stammt von Otto Lilienthal[5]. Bei seinen Vorschlägen für die Konstruktion der Flugapparate schrieb er unter anderem:

> *„30. Die Aufschlagsarbeit des Luftdruckes wäre möglichst in solchen federnden Teilen aufzusammeln, dass dieselbe beim Niederschlag wieder zur Wirkung kommt und dadurch an Niederschlagsarbeit gespart wird.“*

Wenn man also eine Feder so anordnet, dass sie beim Aufschlag vom Flügel gespannt wird und sie sich mit dem Abschlag entspannt, so erfüllt sie diese Bedingung (siehe Bild 32). Den Kreislauf der Windradenergie kann man dann wie folgt beschreiben.

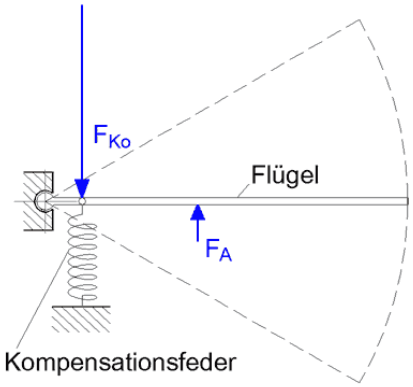


Bild 32 Anordnung einer Zugfeder als Auftrieb-Kompensationsfeder
F_{Ko} = Kraft der Kompensationsfeder
F_A = Auftrieb im Gleitflug

Beim Flügelaufschlag im Windradmodus mindert der dabei auftretende zusätzliche Widerstand die Fluggeschwindigkeit des Flugmodells. Dadurch wird der Modellmasse Bewegungsenergie entzogen. Über die Aufschlagbewegung des Flügels wird die betreffende Energiemenge als Spannenergie in der Feder gespeichert. Während des Abschlags entspannt sich die Feder und gibt die Energie wieder an den Flügel ab. Dort wird sie in Schub umgewandelt. Die Schubkraft beschleunigt das Modell und gibt der Modellmasse die Bewegungsenergie wieder zurück. Die beim Aufschlag mit dem zusätzlichen Widerstand verbundene Energie ist also nicht verloren. Sie kann mit Hilfe elastischer Bauelemente zurückgewonnen werden.

Dieser Energiekreislauf ist natürlich Verlust behaftet. Die Verluste des Flügelaufschlags sind jedoch auch vorhanden, wenn der Flügel im Propellermodus arbeitet. Der induzierte Widerstand im Propellermodus ist im Rechenmodell sogar durchwegs größer als im Windradmodus. Der Vorteil bei der ganzen Geschichte mit dem Windradmodus ist der deutliche Auftrieb, der auch beim Aufschlag erzeugt werden kann.

Da das Auftriebszentrum der Windradkraft immer nahe an der Flügelwurzel liegt, ist die damit in der Feder umgesetzte Energiemenge generell nicht sehr groß. Die Feder kann daher relativ klein sein. Sie braucht mit ihrer mittleren Kraft nur das mittlere Drehmoment des im Windrad-Modus arbeitenden Flügels ausgleichen. Die Feder ist dann in der Lage, die gesamte während des Aufschlags erzeugte Energie des Flügels aufnehmen. Nur ein kleines Problem dabei sind die ungleichen Kräfte von Flügel und Feder während der Aufschlagbewegung. Der Antrieb muss daher während des ganzen Aufschlags den Kraftausgleich und die Führung der Aufschlagbewegung übernehmen. Im Mittel soll er aber beim Aufschlag leer mitlaufen. Mit einem drehzahlgeregelten Antrieb erscheint das möglich.

Wenn man freilich schon so eine Feder verwendet, kann man sie sehr vorteilhaft auch noch für die Speicherung von Antriebsenergie verwenden. Dazu wird die Feder einfach stärker dimensioniert. Wenn sie dann beim Aufschlag nicht nur durch die Windradfunktion des Flügels, sondern auch vom Antrieb gespannt wird, speichert sie auch dessen Energie. Die Feder unterstützt dann beim Abschlag den Antrieb und gibt die Energie wieder ab.

Der Antrieb wird beim Aufschlag durch die Feder belastet und beim Abschlag angeschoben. Die Flügelkräfte, oder genauer gesagt deren Drehmomente, wirken sich auf den Antrieb gerade umgekehrt aus. Auf diese Weise wird der Antriebsmotor während einer Schlagperiode gleichmäßiger und mit viel kleinerer Spitzelast betrieben. Dadurch können Motor und Getriebe deutlich leichter dimensioniert werden. Mit einem Flügelaufschlag im Windradmodus lässt sich so die Spitzenlast des Antriebs im Schlagflug etwa halbieren.

Die Feder wird zweckmäßig so dimensioniert, dass sie in der Mittelstellung des Flügels das Drehmoment des mittleren Auftriebs während einer Schlagperiode gerade ausgleicht. Dieser mittlere Auftrieb während einer Schlagperiode entspricht etwa dem Auftrieb im Gleitflug. Außerdem soll die Federkraft während der ganzen Schlagperiode relativ gleichmäßig sein. Die Federrate soll also möglichst klein gewählt werden. Eine Stahlfeder ist dann allerdings relativ stark, groß und schwer. Eine Gasdruckfeder ist in diesem Fall, trotz ihres schlechteren Wirkungsgrades, vielleicht besser.

Die Feder kompensiert während der ganzen Schlagbewegung den Auftrieb, der im Mittel am Schlagflügel vorliegt. Zur Unterscheidung gegenüber anderen Federn im Schlagflügelantrieb bezeichne ich sie daher als Auftrieb-Kompensationsfeder oder kurz als „Kompensationsfeder“.

Die Kompensationsfeder erleichtert auch die Fixierung des Flügels in der Gleitflugstellung während des Fluges. Beim Start und beim Nachlassen der Auftriebskraft während der Landung drückt sie allerdings die Flügelspitzen nach unten. Wenn also zum Halten der gestreckten Flügelstellung das Rastmoment des stehenden Motors als Bremse nicht ausreicht, so ist ein zusätzlicher Brems- oder Sperrmechanismus erforderlich.

Bei jedem Flügelschlag muss die Flügelmasse im Bereich der beiden Endlagen zunächst abgebremst und dann in Gegenrichtung wieder beschleunigt werden. In der Technik setzt man in solchen Fällen Federn ein. Man erhält damit ein schwingendes System, das im theoretischen Idealfalle (ohne Dämpfung durch die Flügelfläche und ohne Reibung)

auch ohne Energiezufuhr von außen in Bewegung bleibt. Der Antrieb wird dann von den Beschleunigungskräften nicht mehr belastet.

Um bei einer entsprechenden Versuchsanordnung den Einfluss der Schwerkraft bei der Schwingung gedanklich leichter ausblenden zu können, ist in Bild 33 die Masse des Flügel senkrecht hängend dargestellt. Die Gewichtskraft wird also vernachlässigt.

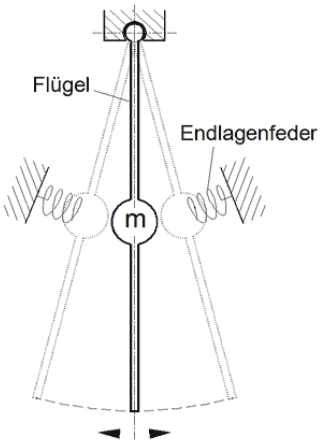


Bild 33
Schwingende Flügelmasse „m“
zwischen zwei Endlagenfedern

Beim Schlagflügel werden die Beschleunigungskräfte durch die Auftriebskräfte überlagert. In der unteren Endlage unterstützt die Auftriebskraft das Abbremsen und Beschleunigen der Flügelmasse. In der oberen Endlage arbeitet sie der Bewegungsumkehr entgegen.

In der Praxis sollte man folgenden Weg gehen. Die untere Endlagenfeder wird einfach weggelassen (siehe folgendes Bild 34). Das Abbremsen der Flügelmasse am Ende des Abschlags kann seine Auftriebskraft übernehmen (siehe Kapitel 7.2). Anschließend treibt der Auftrieb des Aufschlags die Flügelmasse in die Gegenrichtung. Auf diese Weise wird auch das „zusätzliche Geweicht“ der Beschleunigung vermieden (siehe Kapitel 6.5).

Die obere Endlagenfeder wird zunächst für ihre Aufgabe zur Beschleunigung der Flügelmasse dimensioniert. Dazu wird die Trägheitskraft des Flügels mit ihrem Trägheitsradius (siehe Kapitel 6.5) proportional umgerechnet auf die Federkraft und deren Hebelarm. Kommt keine separate Kompensationsfeder zum Einsatz, so muss man die Endlagenfeder soweit verstärken, dass sie auch noch der Auftriebskraft entgegenwirken kann. Dazu wird die Endlagenfeder im zusammen gedrückten Zustand zusätzlich um die Kraft stärker bemessen, die zum Ausgleich der Auftriebskraft des Gleitfluges am Flügel erforderlich ist. Der Auftrieb beim kurzzeitigen Flügelstillstand im Laufe der Bewegungsumkehr entspricht ja theoretisch etwa dem im Gleitflug. Die Endlagenfeder kann so die Beschleunigung der Flügelmasse übernehmen und gleichzeitig der dabei störenden Auftriebskraft entgegenwirken.

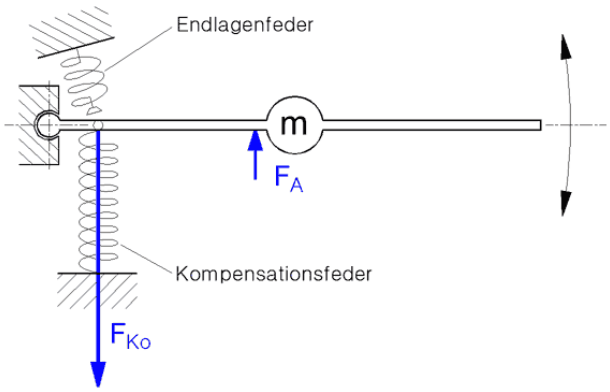


Bild 34 Anordnung von Kompensations- und Endlagenfeder bei einem Schlagflügel
Die Kompensationsfeder ist hier als Zugfeder ausgeführt, die Endlagenfeder als Druckfeder.
F_{Ko} = Kraft der Kompensationsfeder
F_A = Auftrieb im Gleitflug

Die Bewegungsenergie des Flügels, wird beim Abbremsen von der oberen Endlagenfeder aufgenommen. Anschließend gibt bei der Beschleunigung der Flügelmasse in Abschlagsrichtung die Feder ihre Spannenergie wieder an den Flügel zurück. Auf diese Weise unterstützt sie den Antrieb beim Abschlag und ebenso mit dem dabei erzeugten Schub die Beschleunigung der Modellmasse. Die Endlagenfeder wirkt also etwa so wie eine verkürzte Kompensationsfeder. Mit einer geeigneten Federkennlinie kann man beide Federfunktionen vielleicht auch in nur einer Feder vereinen. Die Verwendung einer Endlagenfeder lohnt sich insbesondere bei großem Flügelgewicht und nicht abwinkelbaren Flügeln.

Die Windradenergie während des Aufschlags kann also sowohl durch unmittelbare Schuberzeugung im Bereich der Flügelspitze, als auch mit Hilfe von Kompensationsfedern oder mit Endlagenfedern genutzt werden. Alle drei Verfahren lassen sich auch kombinieren. Die genannten Federn erhöhen allerdings das Modellgewicht, verkomplizieren die Konstruktion und erschweren die Handhabung, beispielsweise bei einem Testlauf. Man sollte also auch nach anderen Lösungen suchen.

Bei Vögeln könnte irgendeine Art Federung auch die Vorstellung erleichtern, wie es ihnen möglich ist, ohne viel Muskelkraft stundenlang mit ausgebreiteten Flügeln zu gleiten. Bisher ist mir darüber leider nichts bekannt. Andererseits ist bei Vögeln im Schlagflug der Bedarf zur Energiespeicherung durch entsprechende Gestaltung des Aufschlags vielleicht gar nicht so groß. Erst im Bereich der oberen Schlagendlage wird sicher auch in der Biologie eine Art Endlagenfederung den Übergang vom Aufschlag zum Abschlag unterstützen.

11. Verwendung eines Drehzahlreglers

In Flugmodellen mit Propellerantrieb arbeiten die Fahrtregler meist als Drehzahlsteller. Man kann damit zwar die Drehzahl verändern, die eingestellte Drehzahl ändert sich aber auch bei Änderung der Belastung. Echte Drehzahlregler halten dagegen auch bei wechselnder Belastung die eingestellte Drehzahl konstant.

Ein echter drehzahlgeregelter Schlagflügelantrieb bietet verschiedene Vorteile. Während einer Schlagperiode ist ja der Antrieb im Normalfalle sehr ungleichmäßig belastet. Nur der Flügelabschlag erfordert die volle Antriebsleistung. Bei ungeregelten Antrieben steigt daher während des Aufschlags die Drehzahl deutlich an. Außerdem benötigen die in der Mechanik meist verwendeten Kurbeln im oberen und unteren Totpunkt fast kein Antriebsmoment[H]. Der Motor läuft dort praktisch im Leerlauf. Er reagiert darauf mit einem deutlichen Drehzahlanstieg. Dazu kommen Drehmomentschwingungen, die sich durch federnde Flügelholme ergeben. Das Trägheitsmoment des Motors glättet zwar den Drehzahlverlauf etwas (Mit einem Elektromotor mit Außenläufer oder einem Schwungrad kann man diesen Effekt noch verstärkten und ihn sogar zur Speicherung von Windradenergie verwenden.). Von einem kontinuierlichen oder gar sinusförmigen Bewegungsablauf während einer Schlagperiode kann man aber bei Verwendung von ungeregelten Antrieben sicherlich nicht sprechen. Bei fliegenden Ornithoptern ist die ungleichmäßige Belastung des Antriebs sogar zu hören.

Ist der Auftrieb beim Aufschlag groß genug, kann auch bei laufendem Motor der Flügel der antreibende Teil sein. Er versucht dann ständig den Motor zu beschleunigen. Dieser arbeitet nun als Generator. Ab der eingestellten Soll-Drehzahl wird die Bremse des Reglers aktiv und hält die Drehzahl konstant. Die dabei übertragene Windradenergie kann je nach Regler Typ in Wärme umgewandelt oder durch Rückspeisung in den Akku geleitet werden. In letzterem Falle wird die überschüssige Aufschlagenergie im Akku zwischengespeichert. Sie kann anschließend beim Abschlag wiederverwendet werden.

Die Energiebilanz des Bremsvorganges mit Rückspeisung verschlechtert sich allerdings durch die Wirkungsgrade von Mechanik, Getriebe, Motor, Elektronik und Akku auf dem Hin- und Rückweg der Energie erheblich (Gesamtwirkungsgrad kleiner als 50 %). Zusätzlich beeinträchtigen die meistens verwendeten Kurbeln durch ihre Bewegungscharakteristik das Verfahren. Motor und Getriebe werden beim Abschlag auch nicht

---

[H] Schon E. v. Holst[1] hat festgestellt, dass der Bewegungs- und Kraftverlauf einer einfachen Kurbel für den Antrieb von Schlagflügeln ungünstig ist. Er hat das mit exzentrisch gelagerten Wickelplatten in seinem Gummimotor ausgeglichen (siehe z. B. sein Modell „Bussard“[11]).

entlastet. Das Getriebe muss sogar noch verstärkt werden, da es die wechselnden Belastungsrichtungen aushalten muss. Dennoch kann eine Bremse mit Rückspeisung im Prinzip die Speicherfunktion einer Kompensationsfeder übernehmen.

Wenn es gelingt die überschüssige Windradenergie klein zu halten, ist auch ein echter Drehzahlregler brauchbar, dessen Bremse die Energie in Wärme umwandelt, zumindest am Anfang der Entwicklung. Der Regler ist jedoch gegen Überhitzung zu schützen.

12. Anforderungen an die Ornithopter-Konstruktion

Eine Voraussetzung für eine deutliche Auftriebserzeugung beim Flügelaufschlag ist eine geeignete Flügelkonstruktion. Ob der Flügel im Windradmodus arbeiten kann, hängt entscheidend von der Aufschlaggeschwindigkeit und dem dabei vorliegenden Einstellwinkelverlauf längs der Spannweite ab. Der Flügel muss in der Lage sein, trotz vorhandenem Auftrieb positive Anstellwinkel beizubehalten.

Diese Forderung ist bei Flügeln die den Einstellwinkelverlauf längs des Flügels in Abhängigkeit vom Auftrieb ändern (aeroelastische Flügel), gar nicht so leicht zu erfüllen. Beim aeroelastischen Verfahren verwindet sich die Flügelfläche um eine feste Torsionsachse, welche in der Regel der Holm ist. Dabei wirkt die Auftriebskraft entgegen einer Torsionskraft des Flügels. Die Größe der Verwindung wird durch die Lage und Größe der Auftriebskraft innerhalb der Flügeltiefe, die Elastizität der verwendeten Bauteile und die Lage der Torsionsachse des Flügels bestimmt. Liegt die Torsionsachse weit vorne, so verstärkt eine größer werdende Auftriebskraft, beispielsweise beim Abschlag, das Torsionsmoment. Gleichzeitig wandert dabei aber der Druckpunkt der Auftriebskraft nach vorne und verringert so das Torsionsmoment. Die Größe der Auftriebskraft und die Lage ihres Druckpunktes verhalten sich also gegensätzlich. Die Flügelverwindung funktioniert daher nur sicher, wenn die Torsionsachse sehr weit vorne liegt. Außerdem ist es nicht ganz leicht einen ganz bestimmten Verwindungsverlauf zu erzielen, da sich die Auftriebskraft längs des Flügels ändert und die Festigkeitswerte der Flügelkonstruktion meist fehlen. Mit einem aeroelastischen Flügel lässt sich aber durchaus auch beim Aufschlag Auftrieb erzeugen. Der Flügel muss nur schon im unbelasteten Zustand einen stark positiven Einstellwinkel aufweisen.

Die aeroelastische Verwindung hat den Vorteil, dass sie sich auch ohne Sensorik flexibel an verschiedene Anströmrichtungen bzw. Flugsituationen anpassen kann. Bei den meisten bekannten Schlagflügelkonstruktionen wird der Handflügel ausschließlich aeroelastisch verwunden. Allerdings sollte auch der Übergang zwischen Auf- und Ab-

schlag stufenlos erfolgen. Nur dann lassen sich die Anpassungseigenschaften voll ausnutzen.

Man kann die Flügelverwindung aber auch durch die Antriebsmechanik[I] oder durch Servos[J] steuern. Ebenso lässt sich die Verlagerung des Auftriebs[K] längs der Halbspannweite dafür nutzen. Jedes dieser Verfahren hat Vor- und Nachteile. Aber immer kommt infolge der Elastizität der Bauteile, gewollt oder ungewollt, eine aeroelastische Verwindungskomponente dazu.

Um den Schubbedarf zu minimieren, muss man zunächst einmal versuchen den Restwiderstand des Ornithopters so klein wie möglich zu machen. Im Bereich von Rumpf und Leitwerk ist eine strömungsgünstige Formgebung noch relativ leicht zu verwirklichen. Beim Flügel bedeutet es aber fast zwangsläufig den Übergang von einer Flügelmembrane zu einem Flügelprofil mit einer guten Gleitzahl. Für eine hohe Effektivität des Schlagflugs sind gute Profile sogar unumgänglich. Sie verbessern auch den oft praktizierten Gleitflug der Ornithopter, schränken aber beim Schlagflug die Möglichkeiten für starken Schub im äußeren Flügelbereich ein.

Bei den üblichen Flügelprofilen hat der Auftriebsbeiwert nur einen relativ kleinen Arbeitsbereich. Anders als Membranflügel sind sie nur in sehr geringem Maße in der Lage, mit stark negativen Auftriebsbeiwerten zu arbeiten. In der Regel arbeiten Flügelprofile nur bei positiven Auftriebsbeiwerten gut.

Dicke Profile sind jedoch in der Lage, ganz passabel mit positiven und negativen Auftriebsbeiwerten zu Recht zu kommen. Sie haben aber einen relativ hohen Widerstand. Trotzdem sollte man sie nicht ganz außer Acht lassen. Darüber hinaus ist im äußeren Flügelbereich bei der Profilauswahl dafür zu sorgen, dass zusätzlich zum geplanten Arbeitsbereich des Auftriebsbeiwertes auch noch Reserven vorhanden sind. Die in der

---

[I] Schon E. v. Holst (1940) hat mit seinem Kurbelantrieb mit Gummimotor seiner Schlagflügelmodelle nicht nur die Schlagbewegung, sondern auch die Flügelverwindung bewirkt (siehe http://www.ornithopter.de/herzog.htm#kurbel). Auch die Flügelverwindung der Ornithopter Truefly (siehe http://truefly.chez.com/) und EV1 bis EV5 (siehe http://www.ornithopter.de/bilder1.htm) wurden durch ihre Antriebe gesteuert.

[J] Beim Nachbau des Quetzalcoatlus Northropi (siehe http://www.ornithopter.de/fluegel.htm#maccready) von Paul MacCready und beim SmartBird (siehe https://www.festo.com/group/de/cms/10238.htm) wurden Servos zur ständigen Anpassung der Flügelverwindung eingesetzt. Beim SmartBird wurde nur die Verwindung der langen Handflügel aktiv mit Servos gesteuert.

K Die Verlagerung des Auftriebs längs der Halbspannweite steuerte die Verwindung der Ornithopter EV6 bis EV8. Das gilt insbesondere für den dabei entwickelten aeroelastisch gesteuerte Gelenkschlagflügel (siehe http://www.ornithopter.de/gelenk.htm). Die Druckpunktverlagerung entlang der Flügeltiefe spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle.

Praxis vorkommenden Flugsituationen sind oft anders als vorgesehen. Es ist also ratsam, nur mit Auftriebsverteilungen zu arbeiten, deren negativer Anteil klein ist. Das ist erst bei Zirkulationskennzahlen mit Werten von c_Γ größer 4 der Fall (siehe Bild 8). Das begrenzt die Schuberzeugung noch mehr.

Zur Lösung des Problems mit dem zu kleinen Arbeitsbereich der Auftriebsbeiwerte bzw. den stark wechselnden Anströmrichtungen wurde an der Flügelspitze auch schon mit künstlichen Schwungfedern experimentiert[L]. Sie können mit ihrem Einstellwinkel flexibler auf wechselnde Anströmrichtungen reagieren als eine durchgehende Flügelfläche. Für den Einsatz von Vorflügeln (z. B. Daumenfittich), Wölbklappen und anderen Auftriebshilfen fehlen bis heute leider geeignete Schlagflügelkonstruktionen.

Insgesamt kann man den Übergang zu mehr Auftriebserzeugung beim Aufschlag auch kritisch sehen. An Stelle des Auftriebsproblems gibt es dabei ein Schubproblem. Bodenstarts oder steile Steigflüge sind nur noch nach Änderung der Arbeitsweise des Schlagflügels möglich. Außerdem sind die technischen Anforderungen relativ hoch. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Es ist sehr zweckmäßig Flügelprofile mit einer guten Gleitzahl zu verwenden. Insbesondere im äußeren Flügelbereich sollten sie einen großen Arbeitsbereich des Auftriebsbeiwertes haben und möglichst auch mit negativen Anstellwinkeln arbeiten können.
   Eine große Flügeltiefe längs der ganzen Spannweite verhilft zu Auftriebsbeiwert-Reserven. Sie ist aber mit einem höheren Profilwiderstand verbunden.
2. Es ist eine Flügelkonstruktion erforderlich, die auch bei vorhandenem Auftrieb einen positiven Anstellwinkel während des Aufschlags beibehalten kann.
3. Die Verlagerung des Auftriebs längs der Halbspannweite wird insbesondere durch geeignete Flügelverwindungen bewirkt. Die damit alleine erreichbare Konzentration des Auftriebs beim Aufschlag in Spannweitenmitte reicht aber nur für mäßigen Schub und mäßigen Auftrieb. Eine Neigung der Flügelschlagebene unterstützt die Verlagerung in beiden Schlagtakten.
4. Beim Aufschlag kommt zur Konzentration des Auftriebs in Spannweitenmitte bzw. zur Schubsteigerung, eine Drehung der Flügelwurzel in Betracht (nur beim Aufschlag). Zusätzlich kann die Abwinklung des Handflügels nach unten eingeplant werden. Bei starker Konzentration des Auftriebs stört dann

[L] zum Beispiel bei meinem Modell EV7b, siehe http://www.ornithopter.de/bilder3.htm#ev7b

auch ein großer Auftrieb nicht mehr bei der Schuberzeugung. Dabei helfen eine große Flügeltiefe und eine starke Profilwölbung nahe der Flügelwurzel.

5. Beim Aufschlag soll der Flügel nur von aerodynamischen Kräften angetrieben werden. Im Regelfall ist sogar eine Kraft entgegen der Aufschlagbewegung erforderlich. Vorzugsweise geschieht dies durch negativen Auftrieb mit Schuberzeugung im äußeren Flügelbereich.
6. Beim Aufschlag ist, bei nicht ausreichender Konzentration des Auftriebs in Spannweitenmitte, die überschüssige Windradenergie in eine Vorrichtung zur Energiespeicherung zu leiten (z. B. Federn, Akku, Schwungrad), die anschließend den Abschlag unterstützt.
7. Für den Abschlag sollte auch außen am Flügel die Flügeltiefe groß sein, insbesondere dort, wo bei Vögeln der Daumenfittich seinen Wirkbereich hat.
8. Zur Schubsteigerung kann beim Abschlag die Winkelgeschwindigkeit über weite Strecken annähernd konstant gehalten werden.
9. Der Restwiderstand des ganzen Fluggeräts ist zu minimieren.
10. Zur Kurvensteuerung mit den Flügeln ist es zweckmäßig, die Verwindung zu beeinflussen, insbesondere im äußeren Flügelbereich.

Wenn man die großartigen Flugleistungen der Vögel nachahmen oder einfach nur sehr energieeffizient fliegen will, muss man sich wohl noch mehr mit der Auftriebserzeugung beim Aufschlag befassen.

Hinweise zum Rechenprogramm „Orni 1“

Im Rechenprogramm „Orni 1“[4] wird das in der Aerodynamik anerkannte Gleichungssystem von R. T. Jones[13] verwendet. Alle hier dargestellten Auftriebsverteilungen wurden damit berechnet. Das Programm gilt nur für die einfachste Flugart, also den unbeschleunigten Horizontalflug und den flachen Steigflug. Außerdem beschränkt es sich auf rechteckige, gerade, ungepfeilte Flügel unter quasistationären Strömungsbedingungen. Diese Rahmenbedingungen gelten hier ganz allgemein.

Das Gleichungssystem von R. T. Jones hat die Besonderheit, dass die daraus resultierenden Auftriebsverteilungen, unter Berücksichtigung der Lage ihres Auftriebszentrums, das Minimum des induzierten Widerstandes aufweisen. Das ist auch für Vögel

vorteilhaft. Sie arbeiten also wahrscheinlich im Reiseflug mit ähnlichen Auftriebsverteilungen.

Mit dem Rechenprogramm „Orni 1“ kann man sich auch alle dazugehörigen Verteilungen von Auftriebsbeiwert, Abwind, Einstell- und Anstellwinkel bei einem rechteckigen Flügel ansehen. Es sind dort allerdings einige Begriffe anders definiert (Auftrieb = Querkraft, senkrechte Kraft = Auftrieb, Schub oder zusätzlicher Widerstand = Vortrieb).

Quellenangaben

[1] Erich von Holst. Über “künstliche Vögel” als Mittel zum Studium des Vogelflugs. Journal für Ornithologie, Leipzig, Vol. 91, 1943, pp. 426-447

[2] Rayner, J. M. V. Vertebrate flapping flight mechanics and aerodynamics, and the evolution of flight in bats. In Bat Flight – Fledermausflug (Biona Report 5) (ed. Nachtigall, W.), S. 27-74. Gustav Fischer, Stuttgart, 1986.

[3] Tennekes Henk. Kolibris und Jumbo-Jets, Die simple Kunst des Fliegens. Birkhäuser Verlag, Basel; Boston; Berlin, 1997

[4] Räbiger Horst. Rechenprogramm „Orni 1“ und andere Programme, siehe http://www.ornithopter.de/rechnung.htm

[5] Lilienthal Otto. Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin, 1889

[6] Oehme Hans. Über den Kraftflug großer Vögel. Beiträge zur Vogelkunde. Band 11, Seite 1-31, Aula-Verlag, Wiebelsheim, Leipzig, 1965; please look at http://www.ornithopter.de/daten/kraftflug_gr.pdf

7 Räbiger Horst. Wie Ornithopter fliegen, Aerodynamik und Dynamik großer Schlagflügelmodelle. Selbstverlag Nürnberg, 2001, siehe http://www.ornithopter.de/handbuch.htm

[8] Lloyd Buck . Video: “Greylag Goose Slow Motion Flock Flying Over Lake” zwei Bilder bei der Spielzeit ca. 2:12, gespiegelt https://www.youtube.com/watch?v=eIcx63VW9Xw und http://www.birdsinslowmotion.com/ Wenn man die Nickbewegung des Vogelkörpers kennt, kann man sie auch bei einem Weißkopf-Seeadler noch erkennen https://www.youtube.com/watch?v=El21Wj07zyc .

[9] Piskorsch Adolf. Animation von Bildern seiner Filmaufnahme von einem Schwan http://www.ornithopter.de/grafik/prinzip/swan.gif und die Animation von einem fliegenden Storch http://www.ornithopter.de/grafik/prinzip/white_stork.gif aus der Webseite http://www.ornithopter.de/prinzip.htm

[10] Karl Herzog. Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik. Heftreihe Mechanikus, J. F. Schreiber Verlag Esslingen, November 1963 siehe Webseite http://www.ornithopter.de/herzog.htm

[11] Räbiger Horst. Webseite: Wie Ornithopter fliegen, siehe http://www.ornithopter.de

[12] Karl Herzog. Anatomie und Flugbiologie der Vögel. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1968

[13] Jones Robert T. The spanwise distribution of lift for minimum induced drag of wings having a given lift and a given bending moment. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Note 2249, Dez. 1950, siehe https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19760012005