

Auftrieb beim Flügelaufschlag

Horst Rübiger (Feb. 2015)

Version 7.0

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	1
2. Betriebsarten des Flügelaufschlags	7
3. Sinusförmiger Verlauf	11
4. Auftriebsgröße nur mit Flügelverwindung.....	12
5. Drehung der Flügelwurzel.....	13
5.1 Auftriebsgröße bei Drehung der Flügelwurzel	13
5.2 Auftrieb in den Schlagendlagen.....	14
5.3 Flügelbewegungen bei einem Schwan.....	17
5.4 Phasenverschiebung der Auftriebsverlagerung an der Flügelwurzel	19
5.5 Drehung der Flügelwurzel bei Ornithoptern.....	21
6. Abwinklung des Handflügels nach unten.....	22
6.1 Nutzen der Abwinklung.....	22
6.2 Zeitlicher Ablauf der Abwinklung.....	23
6.3 Auftrieb am Handflügel.....	24
7. Schwenken des Handflügels nach hinten	27
8. Neigung der Flügelschlagebene	29
9. Energiespeicherung mit Federn.....	31
10. Verwendung eines Drehzahlreglers.....	35
11. Anforderungen an die Ornithopterkonstruktion	36
Hinweise zum Rechenprogramm „Orni 1“	39
Quellenangaben.....	40

1. Einführung

Das Grundprinzip der Auftriebs- und Schuberzeugung beim Schlagflug wurde schon von Erich von Holst¹, 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 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.

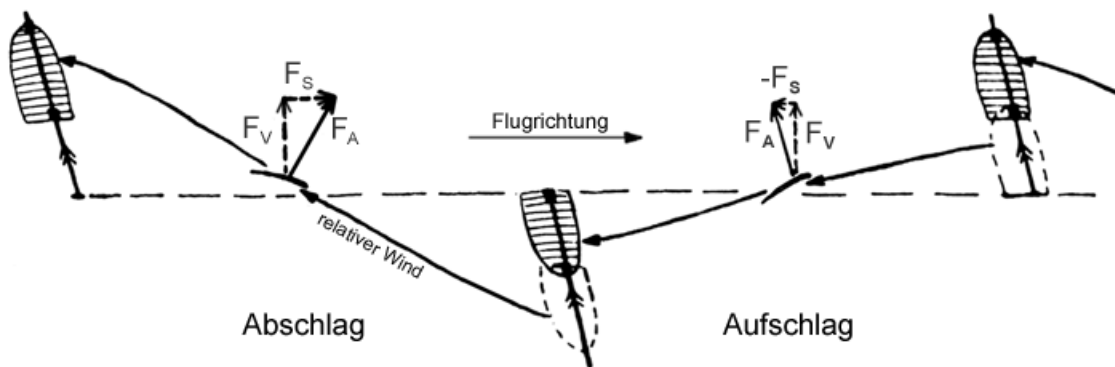


Bild 1 Grundprinzip der Auftriebs- und Schuberzeugung durch Auftriebsverlagerung beim Vogelflug, Erich von Holst¹, 1943

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 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.

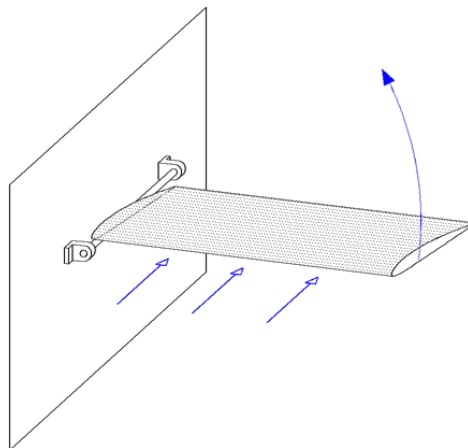


Bild 2 Ein an der Flügelwurzel drehbar montierter Flügel im Windkanal

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 Druckpunkt Abstand 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.

Bei der Anwendung der Kraftbezeichnungen in 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.

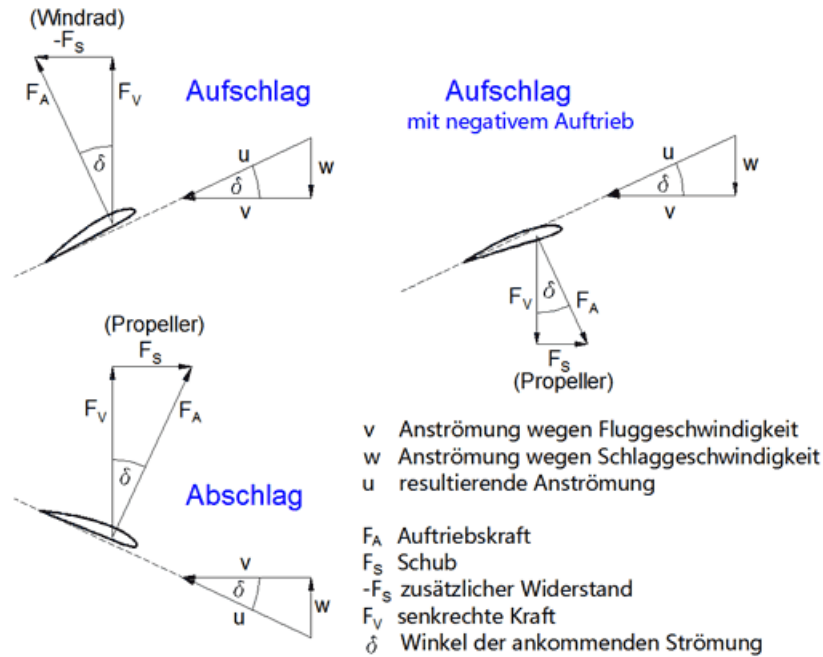


Bild 3 Kräfte am Schlagflügel an einem Flügelort im Bereich der Flügelspitze. Profil- und induzierter Widerstand sind hier nicht dargestellt. Man kann den zusätzlichen Widerstand $-F_S$ beim Aufs Schlag mit positivem Auftrieb auch als Betriebs- oder Arbeitswiderstand der Windradfunktion bezeichnen.

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

$$\text{Kraft [N]} \times \text{Wirkungsdauer [s]} = \text{Kraftimpuls [Ns]}$$

Man kann in erster Näherung annehmen, dass der Abschlag etwa die halbe Zeit einer Schlagperiode dauert. Bei Auftriebserzeugung nur während des Abschlags muss dabei ein Auftriebsimpuls entstehen der für eine ganze Schlagperiode ausreicht. Er muss also genau so groß sein wie die Auftriebskraft im Gleitflug während der Dauer einer ganzen Schlagperiode. Wegen der kurzen Wirkungsdauer ist dazu ein mittlerer Auftrieb des Abschlags erforderlich, der doppelt so groß ist wie der des Gleitflugs.

$$\text{mittlerer Abschlagauftrieb [N]} = 2 \times \text{Gleitflugauftrieb [N]}$$

$$\text{mittlerer Abschlagauftrieb [N]} \times \text{halbe Schlagperiode [s]} = \text{Gleitflugauftrieb [N]} \times \text{ganze Schlagperiode [s]}$$

Das Maximum des Auftriebs in Abschlagmitte ist dann sogar deutlich mehr als doppelt so groß. In der Regel muss dazu die Flügelfläche gegenüber einem normal belasteten Flügel im Gleitflug etwa verdoppelt werden. Auch aus Festigkeitsgründen wächst damit auch das Flügengewicht entsprechend. Im Gleitflug kann man dann nur noch mit kleiner Flächenbelastung und folglich nur mit kleiner Geschwindigkeit fliegen, zumindest bei optimalem Anstellwinkel. Unter Beibehaltung der Flügelspannweite halbiert sich die Flügelstreckung, mit entsprechend hohem induziertem Widerstand beim Abschlag. Der Profilwiderstand verdoppelt sich. Wegen der größeren Widerstände ist für den Schubausgleich 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 durch den großen Auftrieb beim Abschlag auch das Drehmoment des Getriebes. Auch der Motorstrom und der elektronische Regler sind davon betroffen. Eine Alternative ist die Halbierung des Fluggewichts. Beim Aufschlag gar keinen oder nur sehr wenig Auftrieb zu erzeugen hat also eine ganze Reihe deutlicher Nachteile.

Eine andere Möglichkeit beim Abschlag den Auftrieb zu verstärken ist die Erhöhung der Fluggeschwindigkeit. Das erhöht aber ebenso den Profilwiderstand und erfordert weiterhin eine hohe Antriebsleistung beim Abschlag. Auch der Restwiderstand ist in diesem Falle von der Widerstandserhöhung betroffen. Es ist also sehr zweckmäßig den Abschlag soweit wie möglich zu entlasten und auch beim Aufschlag kräftigen Auftrieb zu erzeugen. Außerdem wird dann die senkrechte Rumpfpendelbewegung kleiner.

Unter Beibehaltung der Auftriebsverteilung 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 Handbuch², 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 durch

die Schlagfrequenz bestimmt. Aber auch das ist hier nicht das Thema. Hier wird generell von einer gleichbleibenden, mittleren Schlagfrequenz^A ausgegangen.

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	Spannweite [m]	Gewicht [kg]	Flächenbelastung [N/m ²]	Vögel ³	Spannweite [m]	Gewicht [kg]	Flächenbelastung [N/m ²]
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

Heutige Ornithopter haben zwar sehr leistungsstarke Antriebe, vertragen aber trotzdem kaum eine Zuladung. Eine Rumpferkleidung zum Schutz der Mechanik ist manchmal schon zu schwer für sie. Dieser Auftriebsschwäche wird durch große Flügelwurzelteufe (ähnlich wie bei Fliegenden Füchsen oder Fledermäusen) und durch starkes Aufrichten des Rumpfes etwas entgegen gewirkt (siehe folgendes Bild 4). 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 allerdings erheblich.

^A Die mittlere Schlagfrequenz f_m [Hz] bei Vögeln beträgt etwa

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

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.

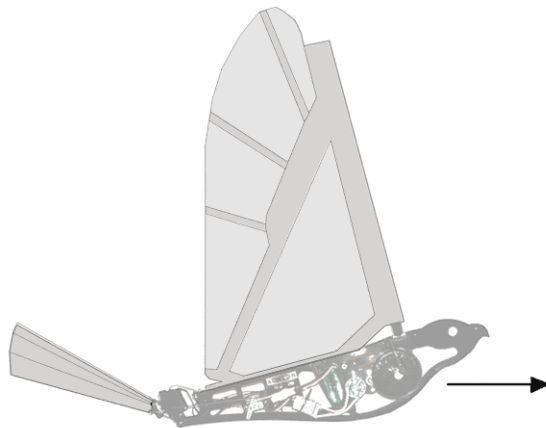


Bild 4
Ornithopter im Horizontalflug

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 5. 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.

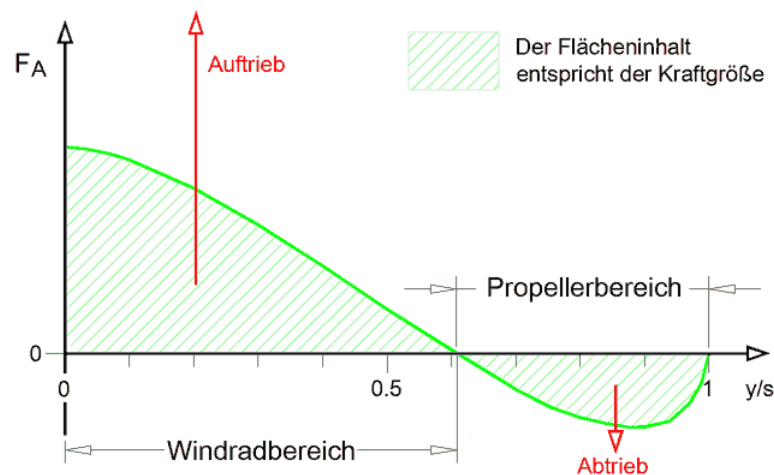


Bild 5 Auftriebsverteilung beim Flügelaufschlag mit ausgeglichenem Drehmoment und ausgeglichenem Schub. Sie markiert die Grenze zwischen überwiegendem Propellerbetrieb und überwiegendem Windradbetrieb. Der Druckpunkt dieser Verteilung liegt genau an der Flügelwurzel. Berechnet mit dem Rechenprogramm „Orni 1“⁴

F_A = Auftriebskraft

y/s = relative Halbspannweite

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.

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 Bewegungsrichtung 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 bewegte Schlagflügel immer noch etwas Auftrieb erzeugt (28 % 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 Motorkraft aufnehmen. Um eine entsprechende Gegenkraft zu entwickeln, ist der Flügel gezwungen 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 und im Bereich der Flügelwurzel einen großen Anstellwinkel haben, werden dann etwa wie in folgendem Bild 6 aussehen.

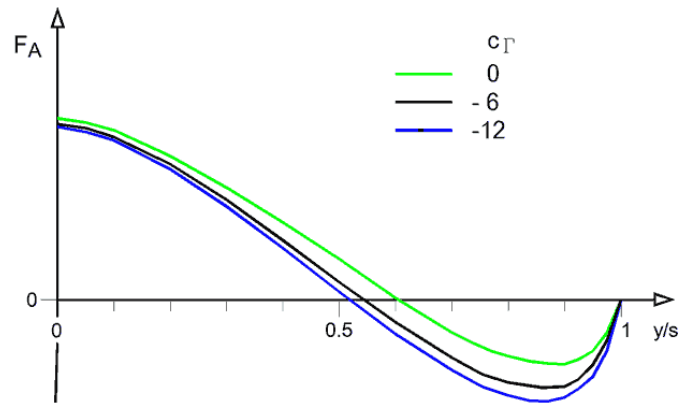


Bild 6 Dies sind Auftriebsverteilungen für den Aufschlag im Propellermodus. Die Auftriebsverteilung ohne Drehmoment ist zum Vergleich mit dargestellt, mit Zirkulationskennzahl $c_\Gamma = 0$. Bei $c_\Gamma = -12$ beträgt der Auftrieb nur etwa 14 % des Gleitflugauftriebs mit elliptischer Verteilung.

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, da sich deren Profilform flexibel nach oben oder unten wölben kann.

Das folgende Bild 7 zeigt einige Auftriebsverteilungsformen für den Aufschlag mit deutlicher Auftriebserzeugung. Sie reichen von der Auftriebsverteilung mit ausgeglichenem Drehmoment bis hin zu einer Auftriebsverteilung die gerade noch durchgehend positiv ist. Damit decken diese Verteilungen etwa den Arbeitsbereich eines Flügelaufschlags im Windradmodus ab.

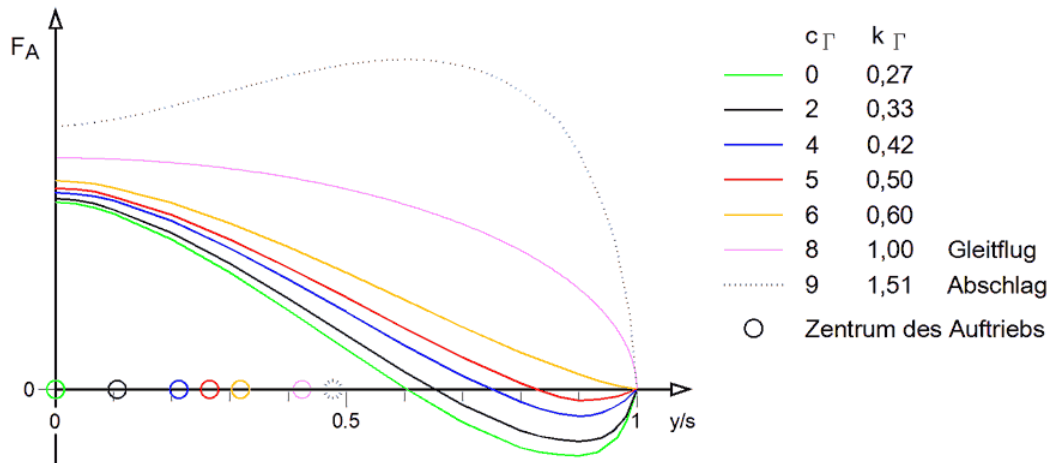


Bild 7 Verschiedene Auftriebsverteilungen für den Aufschlag im Windradmodus

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 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 8). Messtechnisch nachgewiesen wurde sie allerdings bisher weder bei Vögeln noch bei technischen Schlagflügeln.

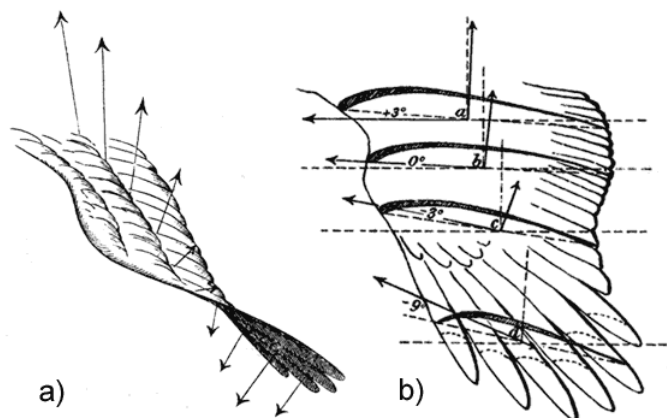


Bild 8 Zwei Beispiele von Auftriebsverteilungen beim Flügelaufschlag von Otto Lilienthal⁵ (1889)

Im Bild „a“ sind allerdings die Kräfte nahe der Flügelwurzel zu sehr nach vorne gerichtet.

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 9).

3. Sinusförmiger Verlauf

In obigem Bild 7 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 9 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.

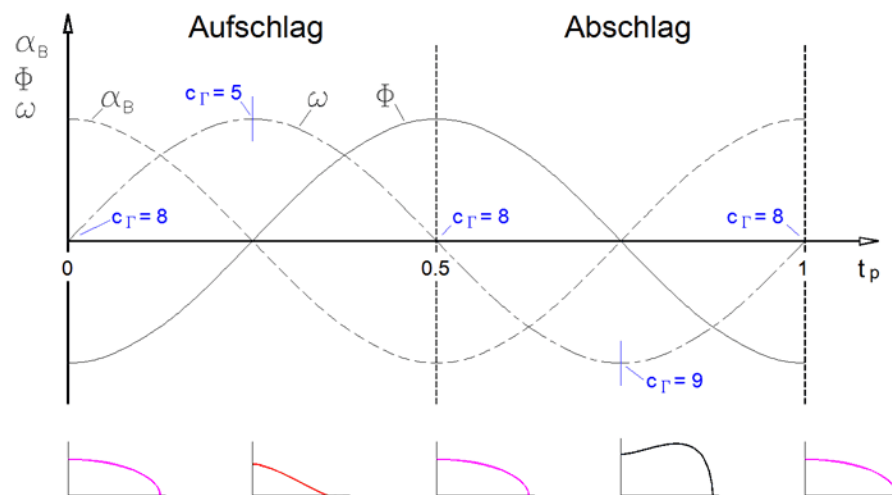


Bild 9 Prinzipieller, zeitlich sinusförmiger Verlauf der Schlagflügelbewegung

- 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 z. B. Bild 7) 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. Sie wird aber zur Beschreibung des Aufschlags benötigt.

4. 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 freiwählbarer Auftriebsverteilungen ergeben. Andere Flügelbewegungen sind nicht erfasst. Dabei 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 diesem Verfahren wird der Auftrieb bei seiner Verlagerung in Richtung der Flügelwurzel immer kleiner. Man darf also dabei beim Aufschlag den Auftrieb nicht allzu weit zur Flügelwurzel verlagern. Der zusätzliche Widerstand ist dann aber noch relativ groß. Die Veränderungen sind aus folgendem Bild 10 ersichtlich.

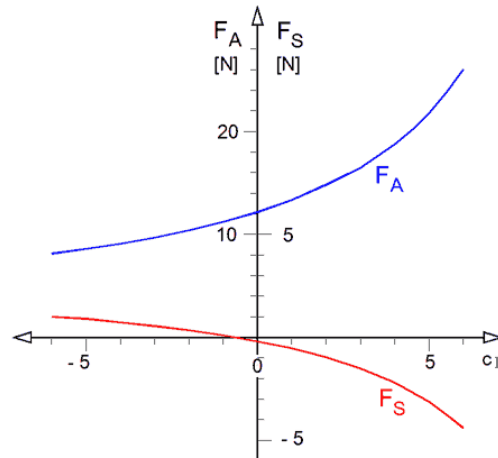


Bild 10 Verlauf von Auftriebskraft F_A und Schubkraft F_S beim Flügelaufschlag in Abhängigkeit von der Zirkulationskennzahl c_Γ (c-Gamma), am Beispiel eines rechteckigen Flügels, berechnet mit dem Rechenprogramm „Orni 1“⁴

Bei der 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 den Randwirbel und die Querströmung. 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 zu vergrößern, sehe ich die Grenze der Auftriebsverlagerung etwa bei der Zirkulationskennzahl $c_{\Gamma} = 5$. Der Auftrieb beträgt dann noch etwa 50 % des Auftriebs mit elliptischer Verteilung (Bild 7). Eine weitere Verlagerung in Richtung Flügelwurzel nur durch Flügelverwindung erscheint nicht sinnvoll. Das gilt zumindest für rechteckige Flügel mit einem einfachen 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 nur für den Horizontalflug oder einen sehr flachen Steigflug.

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.

5. Drehung der Flügelwurzel

5.1 Auftriebsgröße bei Drehung der Flügelwurzel

Durch Drehung der Flügelwurzel in Schlagmitte 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. Holst¹ hat sie aber zur Vergleichmäßigung des Auftriebs vorgeschlagen.

Man kann auf diese Weise (z. B. mit $c_{\Gamma 1} = 5$) den Auftrieb beim Aufschlag so weit erhöhen, bis der Auftriebsbeiwert an der Flügelwurzel den Maximalwert eines einfachen Profils erreicht (siehe Bild 11). Unter Aufrechterhaltung des Kräftegleichgewichts

tes^B 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.

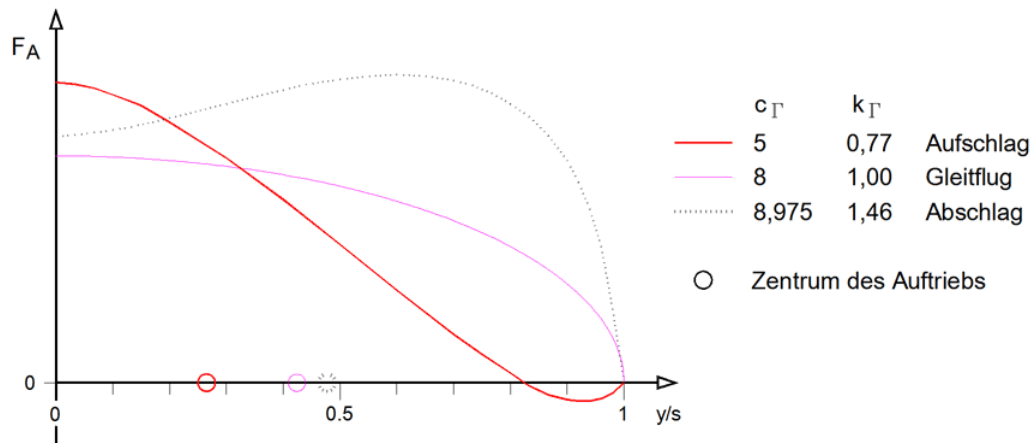


Bild 11 Verteilungen der Auftriebskräfte F_A beim Aufschlag, bei $c_\Gamma = 5$ mit Drehung der Flügelwurzel

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

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 kleiner sein.

5.2 Auftrieb in den Schlagendlagen

Als markantes Zwischenstadium zwischen Auf- und Abschlagn 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 Gleitflugsituati-

^B geänderte Werte für das Kräftegleichgewicht im Rechenprogramm „Orni 1“: Aufschlag Zirkulationskennzahl $c_{\Gamma 1} = 5,0$; Aufschlag Zirkulationsfaktor $k_{\Gamma 1} = 0,772$; Abschlagn Zirkulationskennzahl $c_{\Gamma 2} = 8,975$; Geschwindigkeitsfaktor $k_v = 0,980$

on in den Diagrammen eine gute Orientierungshilfe zur Beurteilung der Veränderungen am Schlagflügel. Die Gleitflugsituation bei Ornithoptern und insbesondere bei Vögeln wird aber mit einer elliptischen Auftriebsverteilung nicht immer richtig beschrieben. Das ist nur eine erste Näherung.

Die Flügelverwindung der Vögel ist durch die Anatomie bei gestrecktem Flügel in der Gleitflugstellung fixiert (siehe Kapitel 7). 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 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. Das Minimum des Anstellwinkels liegt bei der oberen und das Maximum bei der unteren Schlagendlage. Diese Pendelbewegung harmonisiert mit der Vorstellung, dass die Auftriebsverlagerung zeitlich sinusförmig abläuft.

Die folgende Abbildung 12 wurde von der Zeitlupenaufnahme einer Graugans hergestellt (Greylag Goose Slow Motion Flock Flying Over Lake, von Lloyd Buck⁶, nur zwei Bilder bei der Spielzeit ca. 2:12, gespiegelt). 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.

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 13 und die Animationen von Vögeln, nach Filmen von A. Piskorsch⁷). Die Mittellinie des Vogelkörpers zu schätzen ist nur eine Behelfslösung.

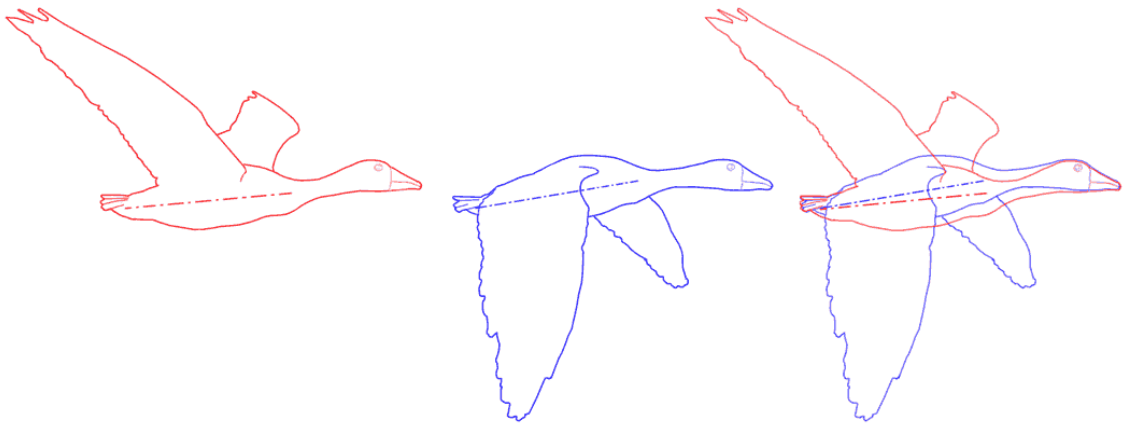


Bild 12 Nicken bzw. Pendeln des Körpers einer Graugans, mit Darstellung der Körperachsen
Zeichnungen nach einer Zeitlupenaufnahme von Lloyd Buck⁶

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, das Schwenken der Handflügel nach hinten (siehe Kapitel 7), die Neigung der Schlagebene (siehe Kapitel 8) 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 „Wie

Ornithopter fliegen“², Bild A 14). Das Rumpfpendeln ist also ein sehr komplexer Vorgang.

Die Nickbewegung kommt in den Schlagendlagen zum Stillstand. Demnach ist 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 hoch gehalten. Beim Abschlag kehrt sich das um. Beides ist im Sinne der Auftriebsverlagerung positiv zu bewerten.

5.3 Flügelbewegungen bei einem Schwan

Etwas anders sieht die Drehung der Flügelwurzel aus, wenn man die Bilder von einem Schwan aus einer Filmaufnahme von A. Piskorsch⁷ auswertet (siehe Bild 13 und 14). Leider ist das Bildmaterial etwas unscharf und das Ergebnis entsprechend ungenau.



Bild 13 Schwan von vorne, aus einer Filmaufnahme von A. Piskorsch⁷

In folgendem Bild 14 wurde das Ende des Aufschlags auf den Beginn der Abschlagbewegung des Armflügels festgelegt (Verlauf des Schlagwinkels Φ). Die Aufschlagbewegung des Handflügels ist dort praktisch abgeschlossen (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.

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 12 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.

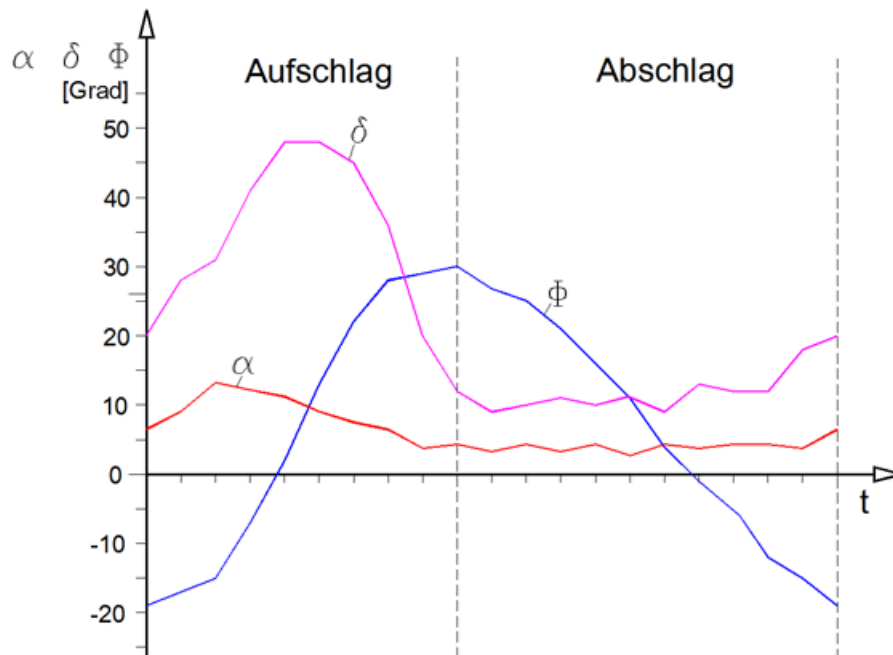


Bild 14 Flügelstellungen während einer Schlagperiode eines Schwanes im Reiseflug nach einer Filmaufnahme von A. Piskorsch⁷

Φ Schlagwinkel des Armflügels gegenüber der Horizontalen

δ Abwinklung des Handflügels gegenüber dem Armflügel

α Anstellwinkel^c an der Flügelwurzel

In Bild 14 ist der Anstellwinkel an der Flügelwurzel insbesondere während Bewegung des Armflügels nach oben erhöht. In dieser Zeit wirkt dann eine sehr große Auftriebskraft im Windradmodus. Infolge der starken Konzentration des Auftriebs nahe am Körper bzw. wegen dem kleinen Hebelarm, 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.

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

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 Handflügels⁹ ist das aber sehr unwahrscheinlich.

Nach seiner Aufschlagbewegung legt der Armflügel 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 7). 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.

5.4 Phasenverschiebung der Auftriebsverlagerung an der Flügelwurzel

Betrachtet man nur den Schlagwinkel $\bar{\Phi}$ und die Größe des Auftriebs in Form des Anstellwinkels α , so hat man den Eindruck, dass beide Größen sich nicht entsprechend dem gewohnten Bild 9 verhalten. Sie scheinen fast unabhängig voneinander zu verlaufen (siehe folgendes Bild 15). 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 φ^*) 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 φ^{**}) vorgezogen. Man kann daher beim Aufschlag auch von einer Phasenverschiebung φ zwischen Schlagbewegung und der Auftriebsverlagerung an der Flügelwurzel sprechen.

Am Ende des Aufschlags legt der Armflügel eine Wartezeit ein. Auch sie dauert kaum länger als die Zeitspanne φ . In dieser Übergangsphase wird der Auftrieb in den äußeren Flügelbereich verlagert und damit die Auftriebsverlagerung und die Schlaggeschwindigkeit wieder in ihre normale Phasenlage zueinander gebracht.

Der Aufbau des Auftriebs in Spannweitenmitte lässt sich an Hand der Drehung der Flügelwurzel recht konkret beschreiben. Gleichzeitig sollte aber nach der üblichen,

bisherigen 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. 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 anscheinend doch der Einsatz von Muskelarbeit erforderlich.

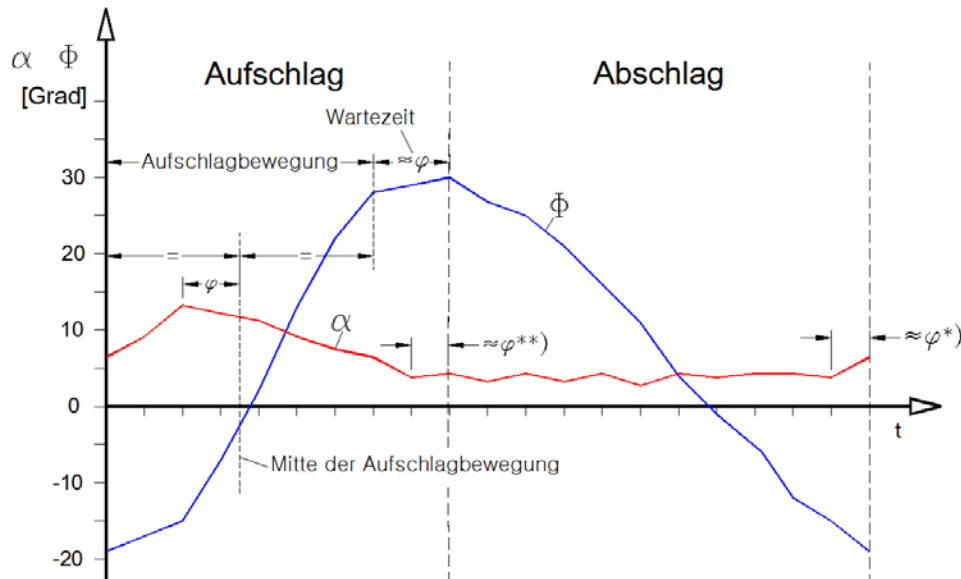


Bild 15 Phasenverschiebung φ zwischen der Auftriebsvergrößerung an der Flügelwurzel und dem Schlagwinkel des Armflügels

- 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

Die Auswirkungen dieser Phasenverschiebung sind noch nicht ganz klar. Bei der Beurteilung ist zu berücksichtigen, dass in dem zugrunde liegenden Diagramm (Bild 15) für die verschiedenen Zeitpunkte etwas willkürlich, einfach die einzelnen Bilder mit ihren von der Filmaufnahme vorgegebenen Zeitabständen verwendet wurden. Außerdem gibt es bisher nur das eine, etwas unscharfe Bildmaterial für den Nachweis der Phasenverschiebung.

Es sieht so aus, als wenn die Phasenverschiebung vom Schwanz 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. In der Summe bleibt so der starke Auftrieb des Abschlags über längere Zeit erhalten. Die Geschwindigkeit der Aufschlagbewegung ist dabei gering. Im Bereich der oberen Schlagendlage wird der Auftrieb hauptsächlich während der Warte-

zeit 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.

Der Auftriebsabnahme im äußeren Flügelbereich dauert nahe der unteren Schlagendlage relativ lange. Trotzdem wird vermutlich schon zum Zeitpunkt des maximalen Auftriebs in Spannweitenmitte auch die maximale Verlagerung des Auftriebs längs des Flügels in diese Richtung stattgefunden haben. Dann liegt zu diesem Zeitpunkt im äußeren, abgewinkelten Flügelbereich besonders negativer oder zumindest sehr wenig Auftrieb vor. Auf diese Weise wird relativ frühzeitig die Abwinklung des Handflügels durch aerodynamische Kräfte unterstützt.

5.5 Drehung der Flügelwurzel bei Ornithoptern

Für Ornithopter wird es nicht ganz einfach, die Nickbewegung des Rumpfes 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?

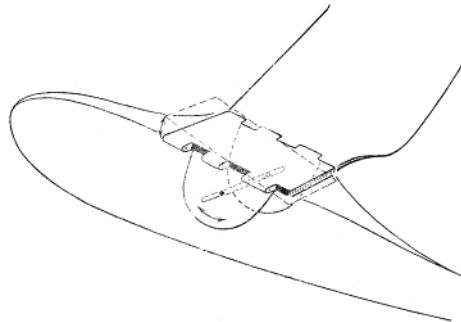


Bild 16 Vorschlag zur Konstruktion einer Flügelwurzeldrehung von Karl Herzog⁸, aus seiner Artikelserie „Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik“, Nov. 1963

Die Schwan-Daten in Bild 13 und 14 sind, genau wie die Graugans-Darstellung in Bild 12, nur Einzelfälle einer nicht näher beschriebenen Flugsituation jeweils einer Vogelart. Es ist also noch unklar, welcher zeitliche Verlauf des Anstellwinkels an der Flügelwurzel unter welchen Bedingungen der Beste ist.

Die Vergrößerung des Anstellwinkels kann beispielsweise etwa wie in Bild 15 ablaufen und eine entsprechende Phasenverschiebung eingeplant werden. Die Auswirkungen der Flügelwurzeldrehung auf die Größe der Flügelverwindung beim Aufschlag sind aber bei der Konstruktion des Schlagflügels zu beachten (Flügelverwindung kleiner machen).

Die theoretische Beschreibung der Schlagendlagen mit der Auftriebsverteilung des Gleitflugs kann nur einen sehr groben Anhaltspunkt über die Vorgänge in diesem Bereich vermitteln. Generell sollte man das Verfahren der Auftriebsverlagerung während der gesamten Schlagperiode im Auge behalten und nicht immer nur die Verhältnisse in der Schlagmitte betrachten.

6. Abwinklung des Handflügels nach unten

6.1 Nutzen der Abwinklung

Beim Reiseflug der Vögel bleibt die Abwinklung des Handflügels nach unten zwar relativ klein, bei großem Schubbedarf bietet sie aber für Schub und Auftrieb Vorteile. Beim Flügelaufschlag erfolgt die Anströmung am Handflügel mehr von oben. Dadurch kann dort negativer Auftrieb entstehen. Da der Handflügel bei der Abwinklung mit seiner Bewegung nach unten nachgibt, wird der negative Auftrieb nicht so groß. Dies ist ein erster Vorteil der Flügelabwinklung.

Zusammen mit 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 17). Bei negativem Auftrieb ist das vorteilhaft, bei positivem Auftrieb nachteilig.

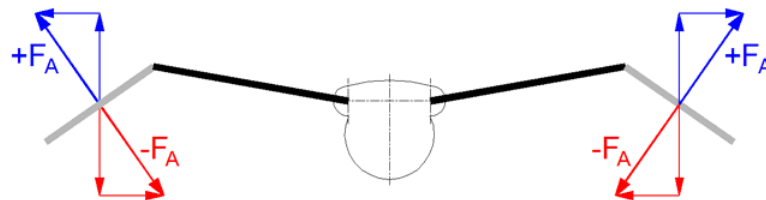


Bild 17 Richtung der Auftriebskräfte bei Abwinklung am Handflügel

blau bei positivem Auftrieb

rot bei negativem Auftrieb

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. Bei Nutzung der Abwinklung kann der Auftrieb durchaus etwas weiter als mit $c_F = 5$ zur Flügelwurzel verlagert werden (siehe Bild 7).

6.2 Zeitlicher Ablauf der Abwinklung

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 etwa die gestreckte Flügelstellung erreicht hat (siehe z. B. Bild 14).

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 Beanspruchung.

Im folgenden Bild 18 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.

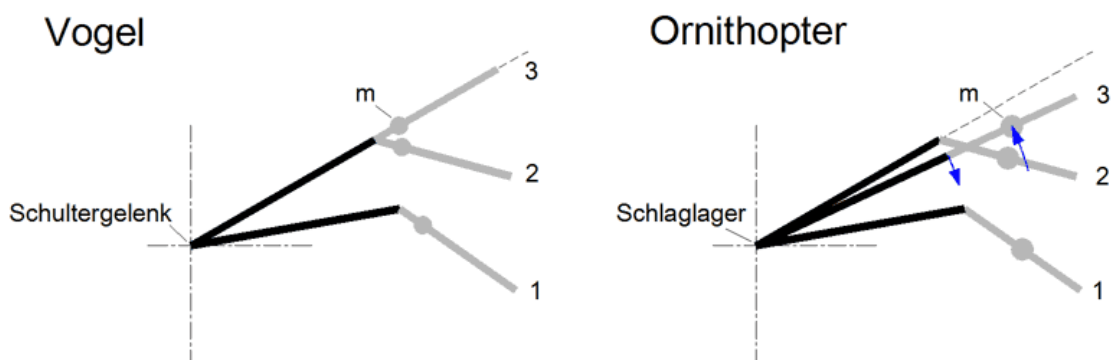


Bild 18 Vergleich des Bewegungsablaufes vom Handflügel im Bereich der oberen Schlagendlage

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 18.

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 im Handflügelbereich. Entsprechend groß ist die Stoßbelastung für den Flügelholm und das Getriebe.

Die Auftriebsverlagerung am Handflügel erfolgt, während sich der innerer Teil abwärts und der äußerer Teil aufwärts bewegt. Diese Drehbewegung ist aerodynamisch ungünstig. Es gibt aber mehrere Möglichkeiten, zumindest 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 abschalten. Man kann es auch mit einem Antrieb versuchen, der bei jedem Belastungsanstieg der Kurbel immer erst eine Feder spannt, bevor sich die Kurbel weiter dreht.
- b) Bei Kurbelantrieben drehzahlgeregelte Antriebe verwenden
Sie sollen im Bereich des Kurbelotpunktes, mit dem dort reduzierten Kraftbedarf und dem noch nicht belasteten Handflügel, nicht mit einem Drehzahlanstieg reagieren.
- 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.

Die Abwinklung soll den Schub verstärken. Wenn aber der erste Teil des Abschlages praktisch ohne Schub erfolgt, wird das Ziel nicht erreicht. Der Armflügel sollte also oben eine Pause einlegt.

6.3 Auftrieb am Handflügel

Welche Auftriebsverteilung des abgewinkelten Handflügels während des Aufschlages zweckmäßig ist, ist unbekannt. Solange keine Versuche und Messungen im Windkanal möglich sind, muss man sich bei der Nachahmung wohl nach der Methode von Versuch und Irrtum an geeignete Anstellwinkel herantasten. Sicherlich können zumindest bei

Beginn der Abwinklung die verschiedenen Varianten der Auftriebsverteilungen von Bild 7 im Bereich des Handflügels weiterhin gelten. Bei der weiteren Abwinklung bleibt dann allerdings die anwachsende Endscheibenfunktion des Handflügels unberücksichtigt.

An Hand von folgendem Bild 19 kann man sich gut vorstellen, dass das Drehmoment des Handflügels um das Handgelenk bei $c_{\Gamma} = 5$ gerade ausreicht um damit den Handflügel nach unten abzuwinkeln. Dieser Auftriebsverteilung wird aber nach der bisherigen Theorie ohne Phasenverschiebung erst in Aufschlagmitte erreicht. Eine Abwinklung nur durch aerodynamische Kräfte würde in diesem Fall also erst im Bereich der Aufschlagmitte beginnen und dort auch gleich wieder enden. Eine Auftriebsverteilung mit etwa $c_{\Gamma} = 5$ kommt also zumindest für eine passive Flügelabwinklung nur mit Hilfe der Phasenverschiebung in Betracht. Aber auch dabei erfolgt die Unterstützung durch aerodynamische Kräfte erst sehr spät.

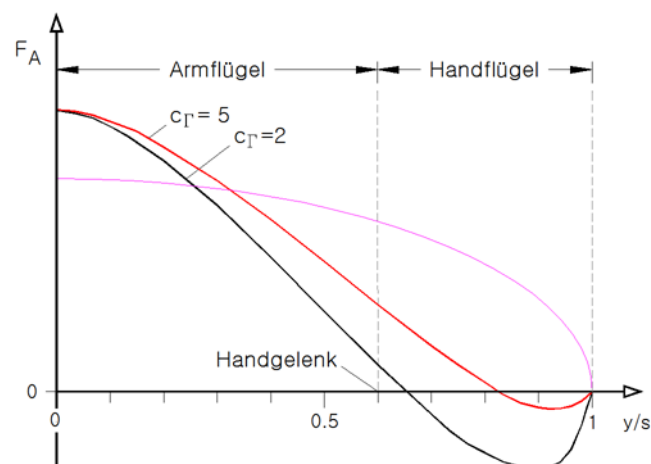


Bild 19 Auftriebsverteilungen für eine Flügelabwinklung

Um die Abwinklung möglichst frühzeitig durch aerodynamische Kräfte zu unterstützen ist eine stärkere Verlagerung des Auftriebs in Richtung Spannweitenmitte erforderlich. In Bild 19 ist als Beispiel dafür eine Auftriebsverteilung mit $c_{\Gamma} = 2$ gewählt. Aber auch dabei ist nur mit Hilfe der Phasenverschiebung ist ein frühes Drehmoment des Handflügels nach unten möglich.

Bei ausreichend negativem Auftrieb weicht der Handflügel der von oben kommenden Anströmung mit seiner Abwinklung 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 weiche Begrenzung der Abwinklung erreichen, wenn man die Achse des Handgelenks hinten leicht nach innen neigt (siehe folgendes Bild 20). Dadurch steigt 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.

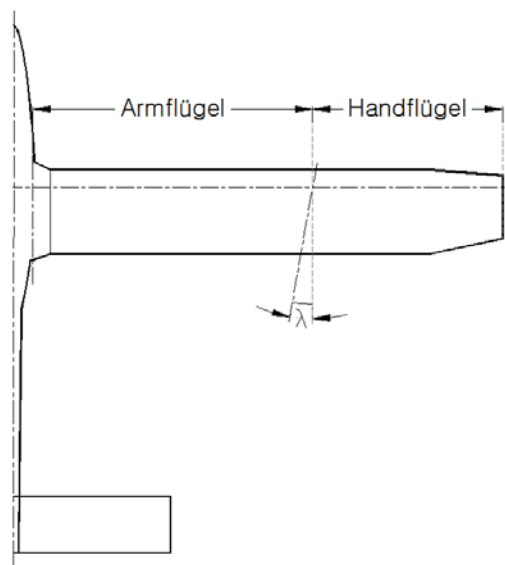


Bild 20 Zusatzwinkel λ des Handgelenks bei einem Ornithopter, für einen Anstieg des Handflügelanstellwinkels während der Flügelabwinklung

Eine Konstruktion mit sehr großem Zusatzwinkel zeigt Bild 21. Sie ersetzt die Flügelverwindung im Unterarm des Vogels durch einen veränderlichen Profilknick entlang der Verwindungsachse (siehe hierzu Bild 22). Während des Aufschlags bei maximalem Profilknick, liegt beim Vogel am Handgelenk zusätzlich die maximale Abwinklung des Handflügels vor. Man kann sich dann gut vorstellen, dass auf diese Weise am äußeren Ende des Unterarms viel Auftrieb ansammelt wird. Anschließend unterstützt dieser Auftrieb durch Druckausgleich den Aufschlag des daneben liegenden Handflügels und wird dabei in Richtung der Flügelspitze verlagert.

Es sieht 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 so etwas bei einer seiner Flügelkonstruktionen mit einem Gummifaden

ausgeführt (siehe Bild 21). 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.

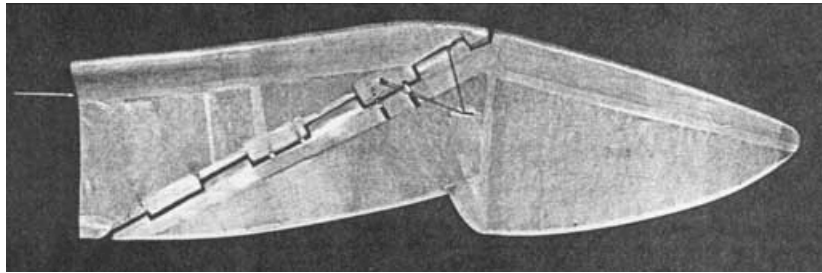


Bild 21 Schlagflügel mit zusätzlicher Profilwölbung verbunden mit einem Anstellwinkelanstieg insbesondere am Unterarm, bei Abwinklung des Handflügels. Ein Gummifaden unterstützt die Abwinklung. Konstruktion von Karl Herzog⁸, 1963

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. 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 Anatomie⁹ stark eingeschränkt (durch Flügel skelett, Sehnen, Randligament zur Aufnahme der Federspulen der Schwungfedern). Ohne Abschlagbewegung liegt dann längs des ganzen Flügels der Anstellwinkelverlauf für den Gleitflug vor. Eine elastische Verwindung des Handflügels, beispielsweise beim Abschlag, ist aber noch möglich und ebenso eine kleine zusätzliche Verwindung durch Muskelkraft. Diese 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 kraftfreie Einstellung der Flügelverwindung für den Abschlag und den Gleitflug. Außerdem erfolgt bei Vögeln zusammen mit der Schwenkbewegung 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 Bild 22). Dadurch ändert sich am Ellenbogen sicherlich auch das Flügelprofil. Vermutlich wird die Profilwölbung verändert. 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.

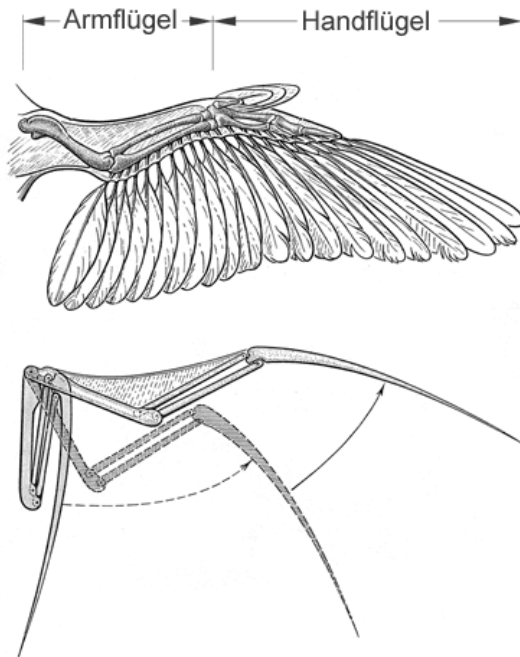


Bild 22
Schwenkbewegung des Vogelflügels,
gezeichnet von Karl Herzog

Auch der Flügel als Ganzes führt eine kleine Schwenkbewegung 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 wie in folgendem Bild 23 täuscht also eine zu große Abwinklung des Handflügels vor, insbesondere nach vorne.

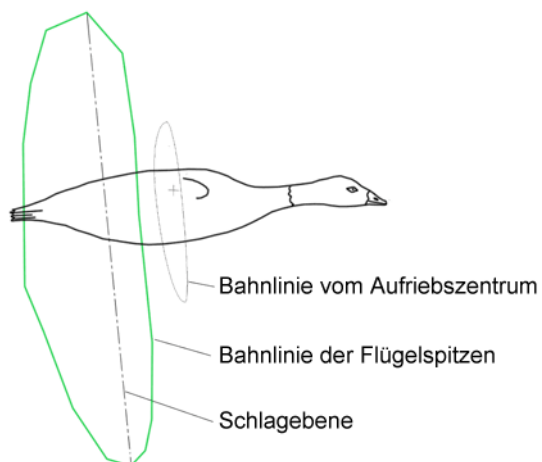


Bild 23
Ringelgans im Reiseflug
mit den Bahnlinien der Flügelspitzen
und des Auftriebszentrums.
Das Auftriebszentrum wurde hier
bei 25 % der Flügelwurzeltiefe
angenommen.

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 12). 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.

8. 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 nicht immer zu sehen. 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 folgendes Bild 24).

Die Neigung wirkt mit dem Auftrieb beim Aufschlag nicht immer in die gleiche Richtung auf die Nickbewegung. Sie unterstützt bei Vögeln das Nicken immer nur gegen Ende der jeweiligen Schlagbewegung. Am Anfang arbeitet sie dagegen. Bei großem negativem Auftrieb im Handflügelbereich kann sich das auch umkehren. Ohne genaue

Kenntnis der verschiedenen Einflussgrößen lässt sich Wirkung der Neigung auf die Nickbewegung hier nicht beschreiben.

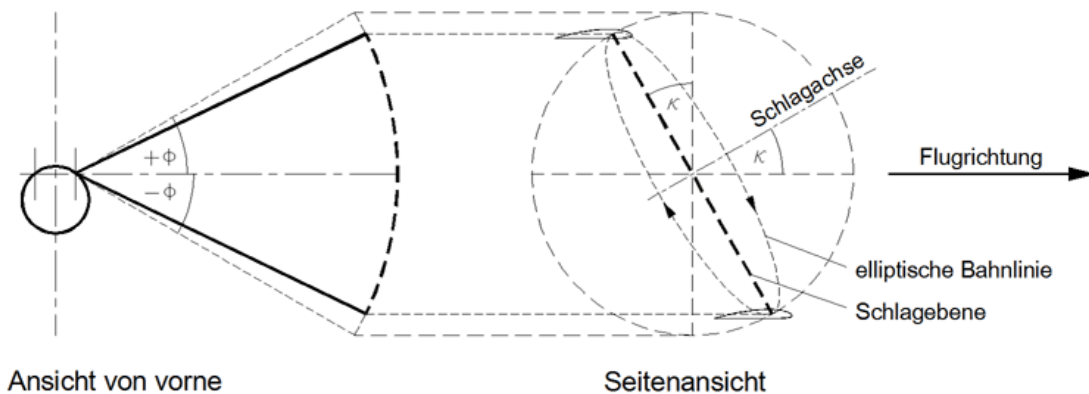


Bild 24 Eingebaute Neigung der Flügelschlagebene durch Kippen der Schlagachse gegenüber der Rumpfachse

Ungleiche Auswirkungen der beiden Schlagtakte auf die Nickbewegung können durch Verschiebung des mittleren Auftriebszentrums gegenüber dem Schwerpunkt ausgeglichen werden. Dies lässt sich am besten durch die mittlere Pfeilung der Flügel erreichen. Die Ausrichtung der Schubkraft infolge der Neigung vorne etwas nach oben, ist im Reiseflug wohl eher von untergeordneter Bedeutung.

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

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 24). Das geht zu Lasten der Schuberzeugung. Wie die Berechnung bei einem großen Ornithoptermodell zeigt, 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 „Wie Ornithopter fliegen“, Kapitel 8.8²).

9. Energiespeicherung mit Federn

Ein erster Hinweis zur Speicherung der Aufschlagenergie bei technischen Fluggeräten stammt von Otto Lilienthal⁵. 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 25). Den Kreislauf der Windradenergie kann man dann wie folgt beschreiben.

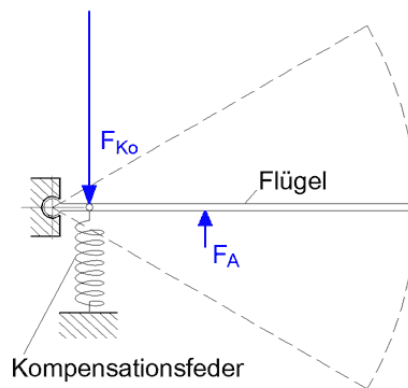


Bild 25 Anordnung einer Zugfeder als Auftrieb-Kompensationsfeder

F_{K0} = 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 zurück gewonnen 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. Das 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 drehzahlregelmäßigem 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 beim Abschlag den Antrieb und gibt so die Energie wieder ab.

Der Antrieb wird dadurch beim Aufschlag stärker belastet und beim Abschlag weniger. Da sich die Auftriebskräfte am Flügel, oder genauer gesagt deren Drehmomente, gerade anders herum verhalten, wird die Spitzenbelastung beim Abschlag abgebaut. 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 für den Schlagflug etwa halbieren.

Die Feder wird zweckmäßig so dimensioniert, dass sie in der Mittelstellung des Flügels mit ihrer Kraft 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 hier trotz schlechterem Wirkungsgrad 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.

Eine dritte Möglichkeit zur Verwendung der Windradenergie ist die Beschleunigung der Flügelmasse. 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) 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 folgendem Bild 26 der Flügel senkrecht hängend dargestellt.

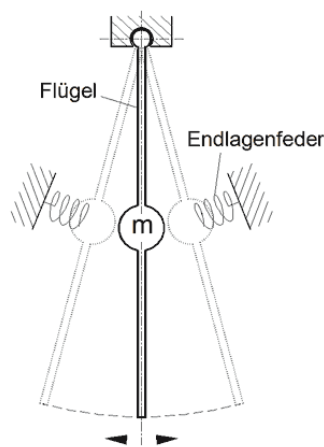


Bild 26
Schwingende Flügelmasse „m“
zwischen zwei Endlagenfedern

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.

Man kann nun in der Praxis folgenden Weg gehen. Die untere Endlagenfeder wird einfach weg gelassen (siehe Bild 27). Das Abbremsen der Flügelmasse am Ende des Abschlags kann seine Auftriebskraft übernehmen. Anschließend treibt die Windradfunktion des Aufschlags die Flügelmasse in die Gegenrichtung. In diesem Falle muss man allerdings dafür sorgen, dass der Anstellwinkel des Flügels schon bei Beginn der

Aufschlagbewegung groß genug dafür ist. In diesem Zeitraum ist bei großen Vögeln im flachen Steigflug nahe der Flügelwurzel manchmal sogar eine Flügeldrehung hin zu mehr positivem Anstellwinkel zu sehen – wahrscheinlich aber insbesondere aus anderen Gründen (siehe Kapitel 5).

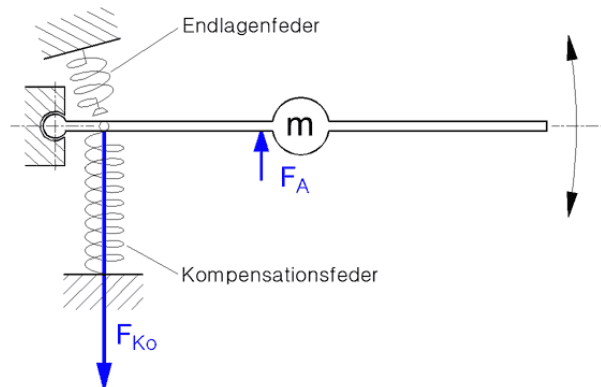


Bild 27 Anordnung von Kompensations- und Endlagenfeder bei einem Schlagflügel

Die Kompensationsfeder ist hier als Zugfeder ausgeführt, die Endlagenfeder als Druckfeder.

F_{Ko} = Kraft der Kompensationsfeder

F_A = Auftrieb im Gleitflug

Die obere Endlagenfeder wird zunächst für ihre Aufgabe zur Beschleunigung der Flügelmasse dimensioniert. Kommt keine separate Kompensationsfeder zum Einsatz, so 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 entgegen wirken.

Die Bewegungsenergie die während des Aufschlags durch den Windradeneffekt in die Flügelmasse geflossen ist, wird beim Abbremsen von der oberen Endlagenfeder aufgenommen. Anschließend gibt die Feder ihre Spannenergie bei der Beschleunigung der Flügelmasse in Abschlagsrichtung wieder ab. Auf diese Weise unterstützt sie den Antrieb beim Abschlag und ebenso mit dem dabei erzeugten Schub die Beschleunigung der Modellmasse. Die Endlagenfeder wirkt 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.

Die Nutzung der Windradenergie während des Aufschlags kann also sowohl durch unmittelbare Schuberzeugung im Bereich der Flügelspitze, als auch mit Hilfe von Kompensationsfedern oder mit Endlagenfedern erfolgen. 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.

10. 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 beim Wechsel der Belastung. Echte Drehzahlregler halten dagegen auch bei wechselnder Belastung die eingestellte Drehzahl konstant.

Ein echter drehzahl geregelter Schlagflügelantrieb bietet verschiedene Vorteile. Während einer Schlagperiode ist ja der Antrieb im Normalfalle sehr ungleichmäßig belastet. Nur der Flügelabschlag erfordert die volle Antriebsleistung. Bei unregelmäßigen 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. 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 verstärken und ihn sogar zur Speicherung von Windradenergie verwenden.). Von einem kontinuierlichen oder gar sinusförmigen Bewegungsablauf während einer Schlagperiode kann man aber bei Verwendung von unregelmäßigen 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 Reglertyp 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 wieder verwendet werden.

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

11. Anforderungen an die Ornithopterkonstruktion

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 trotz vorhandenem Auftrieb in der Lage sein, positive Anstellwinkel beizubehalten.

Diese Forderung ist bei verwindungselastischen Flügeln gar nicht so leicht zu erfüllen. Man kann die Flügelverwindung aber durch die Antriebsmechanik^D oder durch Servos^E steuern. Ebenso lässt sich die Verlagerung des Auftriebs^F längs der Halb-

^D 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.

^E 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.

^F 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.

spannweite dafür nutzen. Jedes dieser Verfahren hat Vor- und Nachteile. Mit all diesen Verfahren wird bei Ornithoptern meist nur die Verwindung des Armflügels beeinflusst.

Dazu kommt in der Regel, gewollt oder ungewollt, noch eine aeroelastische Verwindungskomponente. Sie wird durch die Lage und Größe der Auftriebskraft, die Elastizität der verwendeten Bauteile und die Lage der Torsionsachse des Flügels bestimmt. Liegt die Torsionsachse sehr weit vorne, so verstärkt eine größer werdende Auftriebskraft, beispielsweise beim Abschlag, das Torsionsmoment. Gleichzeitig wandert dabei der Druckpunkt der Auftriebskraft nach vorne und verringert so das Torsionsmoment. Die Größe der Auftriebskraft und die Lage ihres Druckpunktes verhalten sich also gegensätzlich. Es ist daher schwierig die Größe der aeroelastischen Flügelverwindung voraus zu berechnen. Sie funktioniert nur sicher, wenn die Torsionsachse sehr weit vorne liegt. Außerdem ist es nicht ganz leicht einen ganz bestimmten Verwindungsverlauf zu erzielen, da von der Flügelkonstruktion die Festigkeitswerte gegen Torsion meist fehlen.

Die aeroelastische Verwindung hat aber den Vorteil, dass sie sich auch ohne Sensorik flexibel an verschiedene Flugsituationen anpassen kann. Bei den meisten bekannten Schlagflügelkonstruktionen wird der Handflügel ausschließlich aeroelastisch verwunden. Damit lässt sich aber durchaus auch beim Aufschlag Auftrieb erzeugen. Es muss nur schon im unbelasteten Zustand ein positiver Anstellwinkel vorliegen.

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 Membrane 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 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 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 7). 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^G. 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 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:

- a) 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 führt zu Auftriebsbeiwert-Reserven. Sie sind aber mit einem höheren Profilwiderstand verbunden.
- b) Es ist eine Flügelkonstruktion erforderlich, die auch bei vorhandenem Auftrieb einen positiven Anstellwinkel während des Aufschlags beibehalten kann.
- c) 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.
- d) Beim Aufschlag kommt zur Konzentration des Auftriebs in Spannweitenmitte bzw. zur Schubsteigerung eine Drehung der Flügelwurzel in Betracht (nur

^G zum Beispiel bei meinem Modell EV7b, siehe <http://www.ornithopter.de/bilder3.htm#ev7b>

beim Aufschlag). Zusätzlich kann die Abwinklung des Handflügels nach unten eingeplant werden. Bei starker Konzentration des Auftriebs stört dann auch ein großer Auftrieb nicht mehr bei der Schuberzeugung. Dabei helfen eine große Flügeltiefe und eine starke Profilwölbung nahe der Flügelwurzel.

- e) 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.
- f) 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.
- g) Für den Abschlag sollte auch außen am Flügel die Flügeltiefe groß sein, insbesondere dort, wo bei Vögeln der Daumenfittich seinen Wirkungsbereich hat.
- h) Der Restwiderstand des ganzen Fluggeräts ist zu minimieren.

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“

Alle hier dargestellten Auftriebsverteilungen wurden mit dem Rechenprogramm „Orni 1“⁴ berechnet. Es gilt nur für die einfachste Flugart, also den unbeschleunigten Horizontalflug und den flachen Steigflug. Außerdem beschränkt es sich auf gerade, ungepfeilte Flügel unter quasistationären Strömungsbedingungen. Diese Rahmenbedingungen gelten hier ganz allgemein.

Das Rechenprogramm hat den großen Vorteil, dass die verwendeten Auftriebsverteilungen einen relativ kleinen induzierten Widerstand aufweisen. Das ist auch für Vögel vorteilhaft. Sie arbeiten also vermutlich 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 Rübiger Horst. Wie Ornithopter fliegen, Aerodynamik und Dynamik großer Schlagflügelmodelle, Selbstverlag Nürnberg, 2001, siehe <http://www.ornithopter.de/handbuch.htm>
- ³ Tennekes Henk. Kolibris und Jumbo-Jets, Die simple Kunst des Fliegens. Birkhäuser Verlag, Basel; Boston; Berlin, 1997
- ⁴ Rübiger 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 Lloyd Buck . Video: "Greylag Goose Slow Motion Flock Flying Over Lake"
<https://www.youtube.com/watch?v=eIcx63VW9Xw> und
<http://www.birdsinslowmotion.com/>
- ⁷ 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>
- ⁸ 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>
- ⁹ Karl Herzog. Anatomie und Flugbiologie der Vögel. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1968