

Anordnungen der Flügelrandwirbel bei Schlagflügeln

Horst Rübiger (Aug. 2014)

Version 4.1

Inhalt

1	Wirbelanordnung bei Flügeln endlicher Spannweite	1
2	Wirbelanordnung bei Vögeln	5
2.1	Wirbelverlagerung durch Änderung der Flügelform	5
2.2	Vermutete Auftriebsverteilung beim Flügelaufschlag der Vögel	7
2.3	Wirbelverlagerung durch Änderung der Auftriebsverteilung	9
2.4	Der Schubstrahl der Schlagflügel.....	11
2.5	Fächerwirkung des Schlagflügels entlang der Spannweite	14
2.6	Anfahrwirbel	16
3	Nutzung des Wirbelsystems beim Formationsflug	17
3.1	Nutzung des Aufwindes	17
3.2	Widerstandsminderung.....	20
3.3	Der Ritt auf dem Schubstrahl	21
4	Quellenangaben	22

1 Wirbelanordnung bei Flügeln endlicher Spannweite

Um sich ein Bild von den Strömungen und Wirbeln bei einem Schlagflügel zu machen, schauen wir uns zunächst mal an, wie das Wirbelbild an einem herkömmlichen Tragflügel zustande kommt. Der Auftrieb entsteht durch die Anströmung einer Tragfläche, die ein geeignetes Profil und einen positiven Anstellwinkel hat. Dabei entwickelt sich an der Flügelunterseite ein Überdruck und an der Oberseite ein Unterdruck. Beide Drücke versuchen sich durch Umströmung der Flügelspitze gegenseitig auszugleichen. Dadurch entsteht an dieser Stelle ein kräftiger Randwirbel. Die Umströmung der Flügelspitze ist Teil eine Querströmung längs des ganzen Flügels. Auf der Unterseite strömt die Luft nach außen und auf der Oberseite nach innen. Dadurch wird die am Flügel von vorne ankommende Strömung längs der Flügeltiefe in die betreffenden Richtungen abgelenkt.

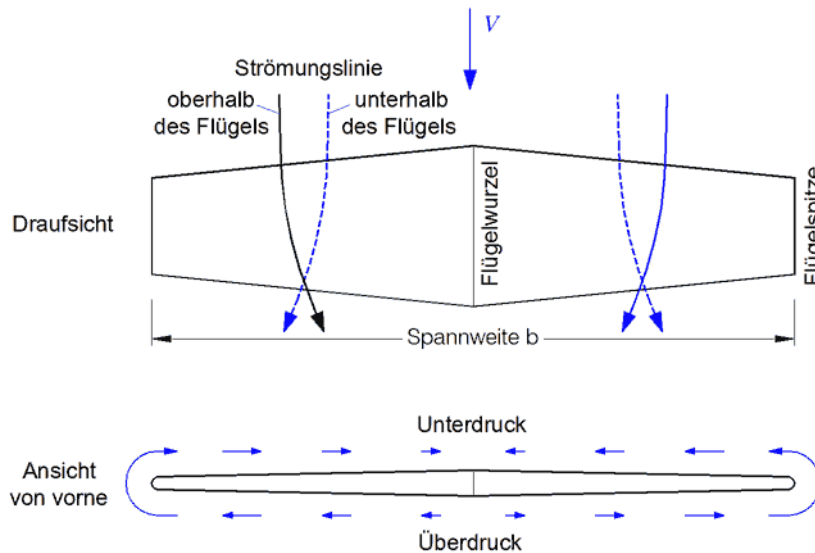


Bild 1 Strömungen am Flügel

In vorstehendem Bild sind einige der von vorne kommenden Strömungslinien eingezeichnet. Diese Luftteilchen treffen an der Flügelhinterkante auf die jeweils anders gerichteten Luftteilchen der anderen Flächenseite. Von da ab werden sie miteinander verdrillt. Man kann sich diese Strömungslinien auch als Fäden vorstellen, die an der Flügelhinterkante zu Wirbelfäden verdrillt werden. Solche Wirbelfäden entwickeln sich längs der ganzen Spannweite. Sie bilden gemeinsam eine durchgehende Wirbelschicht. In einiger Entfernung hinter dem Flügel wird diese wie ein Gummituch von den Randwirbeln auseinandergezogen und aufgewickelt.

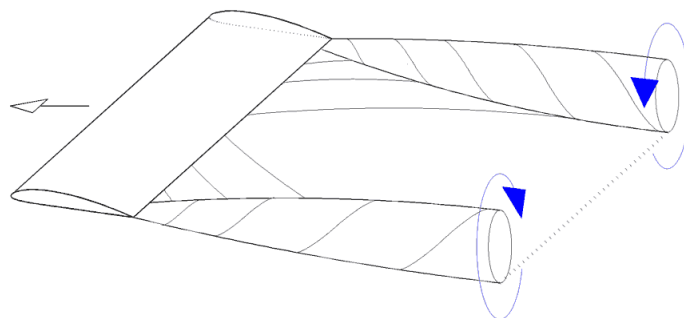


Bild 2 Hinter dem Flügel wird die Wirbelschicht von den Randwirbeln aufgewickelt.

Die Flügelrandwirbel erzeugen keinen Auftrieb. Sie sind nur eine Begleiterscheinung endlicher Flügel. Der Auftrieb entsteht schon am Flügel. Die Druckunterschiede zum umgebenden Luftraum oberhalb und unterhalb des Flügels übertragen auf die vom Flügel erfasste Luftmasse einen Bewegungsimpuls nach unten. Hinter dem Flügel wird diese induzierte Abwindbewegung beibehalten. Sie wird von den Strömungen der Flügelrandwirbel nur überlagert. Nur die Ursache der Randwirbel, die Querströmungen bestimmen den induzierten Widerstand und beeinflussen die Vorgänge am Flügel.

Die quer zur Anströmung verlaufenden Luftströmungen sind abhängig von der jeweiligen Auftriebsverteilung. Am bekanntesten ist wohl die elliptische Verteilungsform. Sie hat bei Flügeln mit begrenzter Spannweite den kleinsten induzierten Widerstand. Das nachstehende Bild 3 der Wirbel entsteht, wenn man in die Auftriebsverteilung Abschnitte bzw. Auftriebsstufen beliebiger aber gleicher Größe einzeichnet. Hier sind es drei Stufen. Die Orte der Auftriebsverteilung die diesen Werten entsprechen werden nach unten gelotet. Sie markieren auf der X-Achse des Diagramms die Lage von einzelnen Wirbelfäden gleicher Stärke entlang der Spannweite.

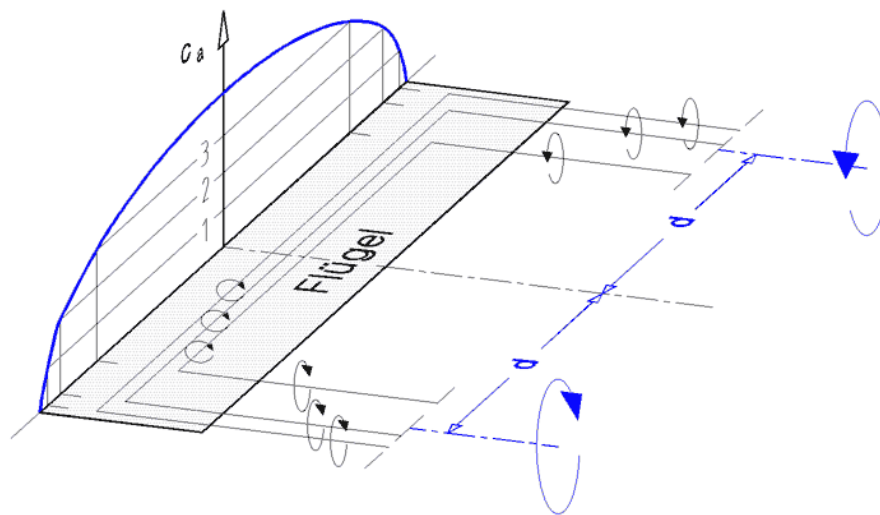


Bild 3 Bestimmung des Randwirbelabstandes „ d “ von der Flügelmitte bei einer elliptischen Auftriebsverteilung. Er ist kleiner als die Halbspannweite.

Innerhalb des Flügels werden sie als gebundene Wirbelfäden bezeichnet und hinter dem Flügel als freie Wirbelfäden. Jeder freie Wirbelfaden nimmt selbst an der Bewegung teil, die durch die übrigen Wirbelfäden an seinem Ort erzeugt wird. Entsprechend diesem Wirbelgesetz verdrillen sich die freien Wirbelfäden gleicher Drehrichtung in einiger Entfernung hinter dem Flügel miteinander in ihrer gemeinsamen Mitte. Der mittlere Abstand d der betrachteten Wirbelfäden von der Flügelwurzel ist also der Ort des gemeinsam gebildeten Flügelrandwirbels.

Dieser Abstand ist aber nur ein theoretischer Wert. Er wird erst erreicht, wenn der Randwirbel alle Wirbelfäden der Halbspannweite eingerollt hat. Das ist erst in einiger Entfernung hinter dem Flügel der Fall. Außerdem werden die innere Reibung und Zähigkeit der Luft dabei vernachlässigt. Man hat aber damit ein relativ einfaches Verfahren, die ungefähre Lage der Randwirbel an geraden Flügeln zu bestimmen. Wenn man die Auftriebsstufen kleiner wählt wird das Ergebnis genauer.

Interessant wird es nun, wenn man die Abstände der Randwirbel von Auftriebsverteilungen bestimmt, die gegenüber der elliptischen Verteilung in Richtung der Flügelwurzel oder zur Flügelspitze verlagert sind. In folgendem Bild 4 sind solche Auftriebsverteilungen dargestellt. Zum Vergleich ist die elliptische Verteilung mit eingezeichnet.

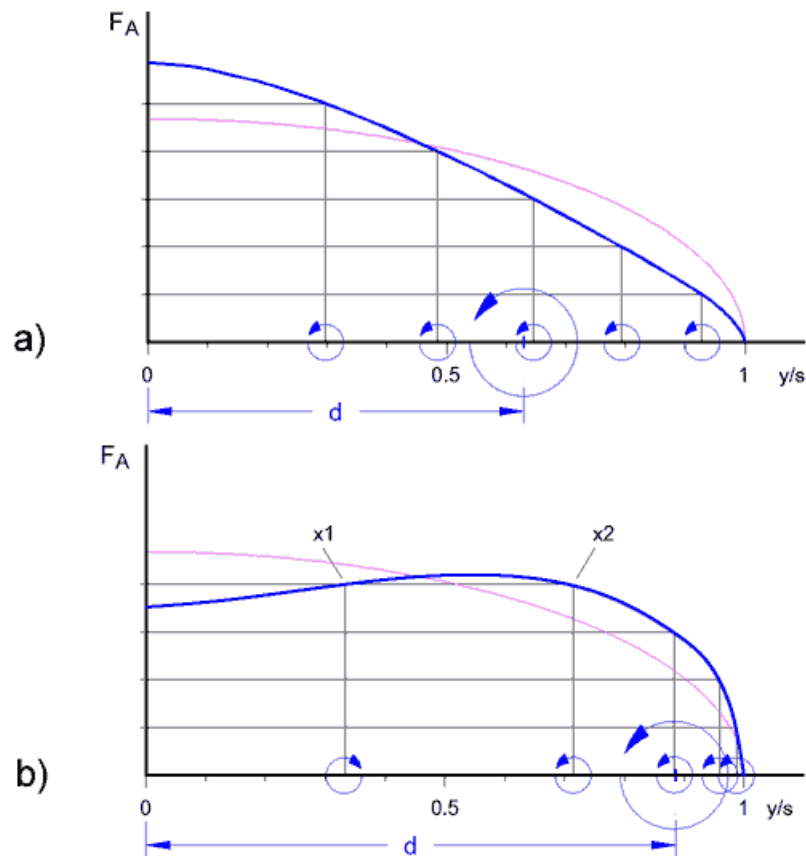


Bild 4 Lage der Randwirbel von Auftriebsverteilungen, die gegenüber der elliptischen Verteilung verlagert sind

a) zur Flügelwurzel verlagert

b) zur Flügelspitze verlagert

Der Gesamtauftrieb jeder Verteilungsform hat die gleiche Größe.

y/s = relative Halbspanweite

Man sieht bei der zur Flügelwurzel verlagerten Verteilung a), dass der „Randwirbel“ sich deutlich von der Flügelspitze entfernt hat. Bei der zur Flügelspitze verlagerten Verteilung b) gibt es in der Höhe der obersten Auftriebsstufe zwei Schnittpunkte mit der Auftriebsverteilung. Es ist zu klären wie sich das auf die Anordnung des Randwirbels auswirkt.

Von der Flügelspitze ausgehend steigt der Auftrieb zunächst stark an. Dort liegen die Wirbelfäden dicht nebeneinander und haben alle die gleiche Drehrichtung. Sie bilden

gemeinsam den starken Flügelrandwirbel. Aber ab der Stelle wo die Auftriebsverteilung zur Flügelwurzel hin abfällt, wechseln die Wirbelfäden die Drehrichtung. Der Wirbelfaden am inneren Schnittpunkt x_1 dreht sich also anders herum als der am Schnittpunkt x_2 . Außerdem bildet der Wirbelfaden bei x_1 mit dem entsprechenden Wirbelfaden auf der gegenüber liegenden Flügelseite einen eigenen kleinen Doppelwirbel. Bei ihm entsteht nicht Abwind, sondern Aufwind.

Der kleine Doppelwirbel nimmt an der Bildung des Flügelrandwirbels nicht teil. Er überlagert ihn nur. Bei der Berechnung des Randwirbelabstandes bleibt der kleine Doppelwirbel daher unberücksichtigt. Erst weiter hinten im Nachlauf des Wirbelsystems werden sich die beiden Wirbelfelder gegenseitig beeinflussen. Sicherlich wird der kleine Doppelwirbel von den großen Flügelrandwirbeln einfach mit aufgewickelt.

2 Wirbelanordnung bei Vögeln

Vorausschicken möchte ich, dass ich hier nur von großen Vögeln spreche. Generell werden quasistationäre Strömungsbedingungen vorausgesetzt. Außerdem betrachte ich hier nur die einfachste Flugart, den unbeschleunigten Horizontalflug bzw. den Reiseflug.

2.1 Wirbelverlagerung durch Änderung des Flügelform

Über die Flügelbewegungen während einer Schlagperiode gibt es relativ viele Untersuchungen. Leider jedoch meist nur von kleineren Vögeln. Man kann sie leichter im Windkanal beobachten. Hier sind detaillierte Auswertungsergebnisse von Zeitlupenfilmen einer Nebelkrähe in einer Beschleunigungsphase zu sehen (folgendes Bild 5). Zusammen mit den Kenntnissen über Flügel mit endlicher Spannweite kann man sich damit schon recht gut eine Vorstellung von der Bewegung des Randwirbels machen.

Über den Flügelabschlag bei Vögeln besteht weitgehende Einigkeit. Der Auftrieb soll bei diesem Takt relativ groß und zur Flügelspitze hin verlagert sein. Der Randwirbel setzt beim Abschlag also sicherlich nahe der Flügelspitze an. Durch das Spreizen der Schwungfedern versucht der Vogel ihn so klein wie möglich zu halten.

Beim Flügelaufschlag geht man allgemein davon aus, dass hauptsächlich in Rumpfnähe Auftrieb besteht. Der Flügel wird dabei mehr oder weniger zusammengefaltet. In Phase 15 ist der Flügel hier soweit zusammengefaltet, dass sicherlich längs der ganzen verbleibenden Spannweite deutlicher Auftrieb besteht. Folglich wird es wie bei Tragflügeln kleiner Streckung eine kräftige Umströmung der äußeren Flügelkante geben. Der nach

hinten und unten abgewinkelte Handflügel wirkt dabei etwa wie eine Endplatte oder ein Winglet. Dadurch werden der Randwirbel und der damit verbundene induzierte Widerstand zu reduziert. Auch beim Flügelaufschlag stimmt also die Lage des Randwirbels mit der Lage der Flügelspitze etwa überein. In Phase 15 ist auch der Armflügel stark verkürzt.

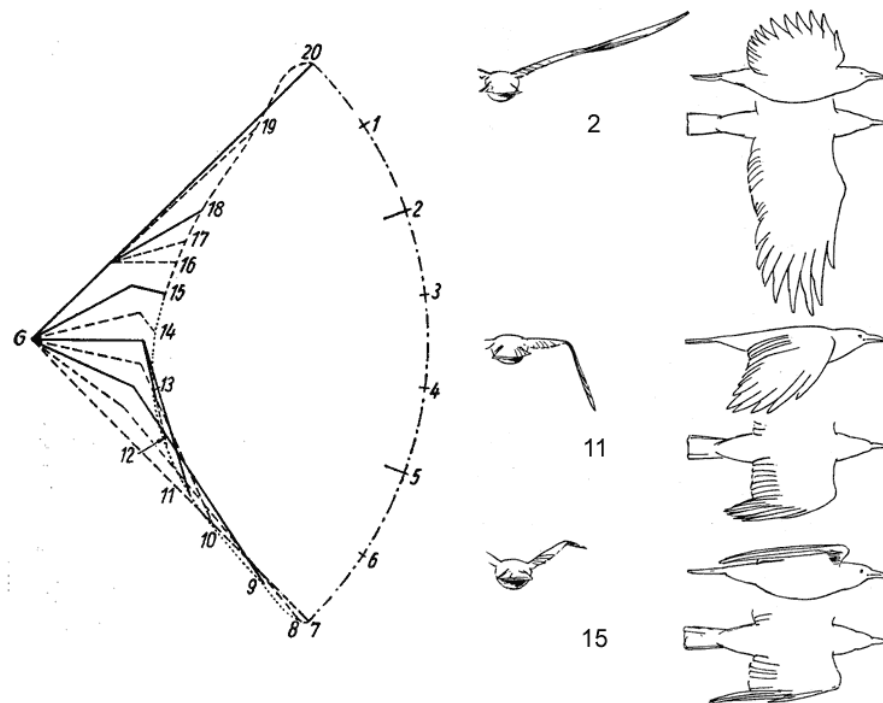


Bild 5 Bilder von der Flügelschlagbewegung einer Nebelkrähe während einer Schlagperiode. Ausgehend vom Schultergelenk „G“ sind hier die Bewegungsphasen von Arm- und Handflügel eingezeichnet. Insbesondere die Bahnkurve der Flügelspitze wird dabei erkennbar. In drei hier ausgewählten Phasen ist der Vogel in jeweils drei Ansichten dargestellt (Bilder von Hans Oehme¹).

Zwischen diesen Extremen eines gestreckten und eines fast völlig zusammen gefalteten Flügels kann sich der Randwirbel während einer Schlagperiode durchaus mal von der Spitze der Schwungfedern ein Stück in Richtung Flügelhandgelenk bewegen. Das ändert aber nur wenig an seiner Bahnlinie einer ganzen Schlagperiode. Sie wird dann nur geringfügig von der hier dargestellten Bahnlinie der Flügelspitzen abweichen.

Ähnliche Bewegungsabläufe finden auch bei vielen kleineren Vögeln statt. Die Bahnlinien der Flügelspitzen liegen aber beim Auf- und Abschlag in Schlagmitte nicht immer so weit auseinander. Insbesondere bei geringen Schubanforderungen werden die Flügel beim Aufschlag weniger stark zusammengefaltet.

2.2 Vermutete Auftriebsverteilung beim Flügelaufschlag der Vögel

Die Suche nach Auftriebsverteilungen, insbesondere von großen Vögeln, die ja ihre Flügel beim Aufschlag nur wenig zusammenfallen, ist schwierig. Messungen der Druckverteilungen am Vogelflügel im Reiseflug sind bisher leider nicht möglich. Für den Flügelabschlag gibt es Textbeschreibungen und sogar Zeichnungen^{2, 3} (für maximalen Schub wie Bild 4b). Aber für den Aufschlag stammt meines Wissens die einzige Skizze einer Auftriebsverteilung von Otto Lilienthal⁴ (1889). Er hat sie beim Storchflügel mit dargestellt. Die heute gängigen Textbeschreibungen sind dagegen recht vage.

Meist wird beim Aufschlag nur Auftrieb im rumpfnahen Bereich angenommen. Der äußere Flügelabschnitt soll dabei mit einem Anstellwinkel in Anblasrichtung hochgezogen werden (Nullauftriebswinkel). Dort soll entweder gar kein Auftrieb vorliegen oder dieser zumindest stark reduziert sein. Diese Beschreibung entspricht zwar dem Grundprinzip der Schub- und Auftriebserzeugung beim Schlagflug, aber wie hat man sich, ohne nähere Angaben, die technischen Zusammenhänge vorzustellen?

Als erstes interpretiere ich die Aussagen über die angegebenen Flügelabschnitte hier so, dass mit dem inneren Flügelbereich der Armflügel gemeint ist und mit dem äußeren Flügelbereich der Handflügel. Beim Storch beträgt die Handflügellänge ungefähr 40 % der Halbspannweite.

Bei Vögeln scheint der geometrische Einstellwinkel an der Flügelwurzel relativ konstant zu sein, zumindest in Schlagmitte. Nach eigenen Beobachtungen von Zeitlupenaufnahmen ändert er sich zwischen dem Auf- und Abschlag kaum. Auch beim Übergang zum Gleitflug hat es den Anschein, dass sich dieser Winkel dabei nur unwesentlich ändert. Leider gibt es über den Einstellwinkel an der Flügelwurzel keine detaillierten Untersuchungen. Nach meiner Einschätzung beginnt die vorstehend beschriebene Auftriebsverteilung der Vögel an der Flügelwurzel mit einem relativ hohen Wert (etwa so wie im Gleitflug). Wahrscheinlich sieht dann die ganze beschriebene Auftriebsverteilung wie in folgendem Bild 6a aus.

An einem Flügel endlicher Spannweite sind Querströmungen unvermeidlich. Flugzeugkonstrukteure würden jedenfalls viel dafür geben, wenn sie den damit verbundenen induzierten Widerstand vermeiden könnten. Wenn also wie in vorliegendem Fall der Auftrieb an der Flügelwurzel groß ist, muss längs der ganzen Spannweite Auftrieb vorhanden sein. Bei negativen Anstellwinkeln im äußeren Flügelbereich ist streckenweise auch negativer Auftrieb möglich.

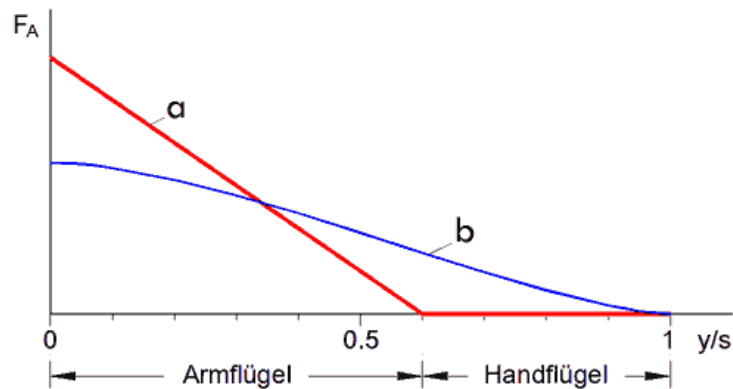


Bild 6 a) Ungefäher Verlauf der Auftriebskraft F_A wie er nach den gängigen Vogelflugbeschreibungen vorliegen soll.
 b) Ein entsprechender Verlauf unter Berücksichtigung der Querströmung längs des Flügels.

Querströmungen treten aber auch dann auf, wenn längs der Spannweite unterschiedliche Auftriebsstärken dicht nebeneinander liegen. Im vorliegenden Fall a) trifft das besonders zu. Die Querströmungen werden daher sehr groß sein. Wenn man den Anstellwinkelverlauf an den Auftriebsverlauf b) annähert, werden die Querströmungen kleiner.

Auftrieb im äußeren Flügelbereich, bedeutet beim Aufschlag einen relativ großen zusätzlichen Widerstand. Offensichtlich wird er bei Vögeln insbesondere aus diesem Grund als nicht vorhanden angenommen. Es ist in den Beschreibungen jedenfalls meist nicht zu erkennen, ob der behauptete Auftriebsverlauf auf Messungen, Beobachtungen oder anderen Grundlagen beruht. Der zusätzliche Widerstand bedeutet aber nur scheinbar zusätzliche Verluste. Man kann die mit ihm verbundene Energie für die Schuberzeugung wieder zurückgewinnen. Schon Otto Lilienthal hat eine der technischen Möglichkeiten dazu beschrieben, Erich von Holst⁵ eine andere beiläufig erwähnt. Aber das ist ein anderes Thema¹⁰.

Der zusätzliche Widerstand liegt bei bestehendem Auftrieb schon im Armflügelbereich vor. Mit zunehmendem Abstand des betrachteten Flügelortes von der Flügelwurzel wird der Winkel δ zwischen Flugrichtung und Anblasrichtung größer. In folgendem Bild 7 kann man sich den dabei zunehmenden zusätzlichen Widerstand F_s beim Aufschlag gut vorstellen.

Ein anderes Problem des Aufschlages ist, dass auch bei ihm deutlicher Auftrieb erzeugt werden muss. Andernfalls würde der Vogelkörper während der langen Schlagperiode großer Vögel viel stärker auf und ab pendeln als das zu beobachten ist. Im Reiseflug der Vögel ist davon fast gar nichts zu erkennen. Außerdem müsste sonst nahezu der gesamte Auftrieb alleine beim Abschlag erzeugt werden. Das wäre aber nur mit einer Vergrö-

berung der Flügelfläche möglich. Die Diskussion, ob der Flügel beim Aufschlag aktiv mit Muskelkraft oder passiv durch Luftkräfte angehoben wird, gibt es schon seit Beginn der Vogelflugforschung. Am besten ist es wohl, wenn man beide Möglichkeiten in Betracht zieht und je nach Flugsituation die am besten geeignete auswählt.

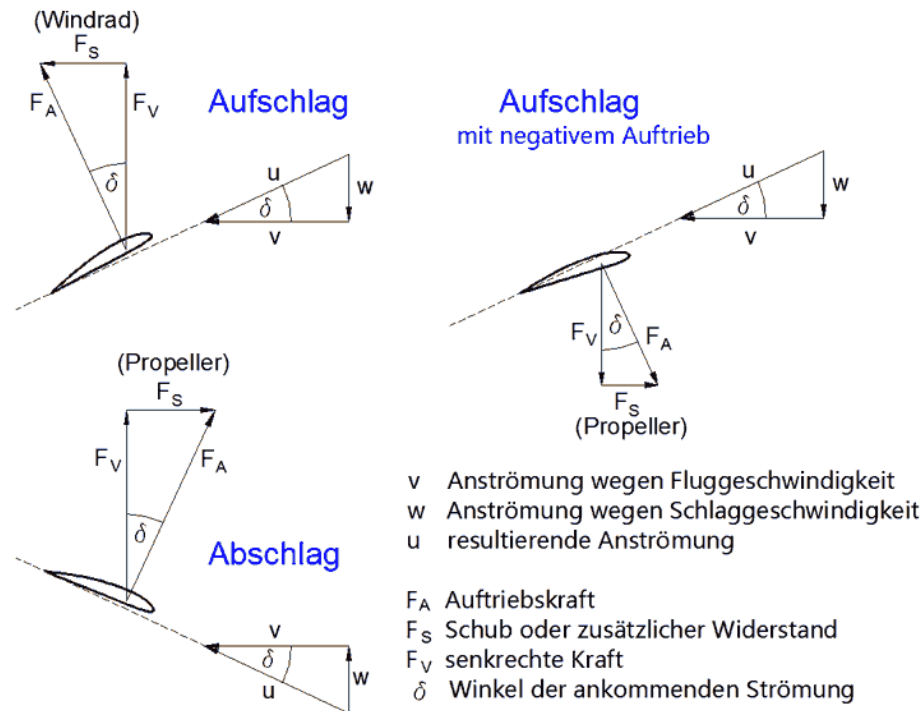


Bild 7 Kräfte am Schlagflügel an einem Flügelort im äußeren Flügelbereich. Profil- und induzierter Widerstand sind hier nicht mit dargestellt.

Eine Auftriebsverteilung wie in Bild 6a wird auch bei Ornithoptern mit Membranflügeln vermutet. Auch bei ihnen ist sie aber nicht möglich, zumindest nicht bei Flügeln mit anliegender Strömung. Die Membrane im äußeren Flügelbereich würde ja sonst beim Aufschlag auch flattern wie ein Segel das in Windrichtung liegt. Darüber wird aber nirgends berichtet. Für Ornithopter gibt es aber die Möglichkeit diesen Sachverhalt durch Messungen im Windkanal zu klären.

2.3 Wirbelverlagerung durch Änderung der Auftriebsverteilung

Mit dem bisher Gesagten kann man sich viele Auftriebsverteilungen ausdenken die beim Vogelflug vorkommen könnten. Die hier dargestellten Auftriebsverteilungen wurden mit dem Gleichungssystem von R. T. Jones⁶ erstellt. Es ist auch Grundlage für das kleine Rechenprogramm „Orni 1“⁷. Alle hier dargestellten Auftriebsverteilungen wurden damit berechnet. Mit diesem Programm kann man sich auch alle dazugehörigen Verteilungen von Auftriebsbeiwert, Abwind, Einstell- und Anstellwinkel bei einem

rechteckigen Flügel ansehen. Einige Begriffe sind dort allerdings anders definiert (Auftrieb = Querkraft, senkrechte Kraft = Auftrieb, Schub oder zusätzlicher Widerstand = Vortrieb).

Das Gleichungssystem von R. T. Jones hat die Eigenschaft, dass alle damit erstellten Auftriebsverteilungen geradlinige Abwindverteilungen haben. Auf diese Weise ist die Verformung der Wirbelschicht hinter dem Flügel gering. Man kann annehmen, dass die dabei auftretenden induzierten Widerstände verglichen mit anderen, ähnlichen Auftriebsverteilungsformen immer relativ klein sein werden.

Die hier gewählte Verteilung nach R. T. Jones⁸ für den Abschlag (folgendes Bild 8) ist bei gegebenem Drehmoment an der Flügelwurzel in Bezug auf den induzierten Widerstand optimal für die Schuberzeugung. Im Vergleich mit einer gleich großen elliptischen Verteilung liefert sie bei gleichem Wirkungsgrad ca. 10% mehr Schub.

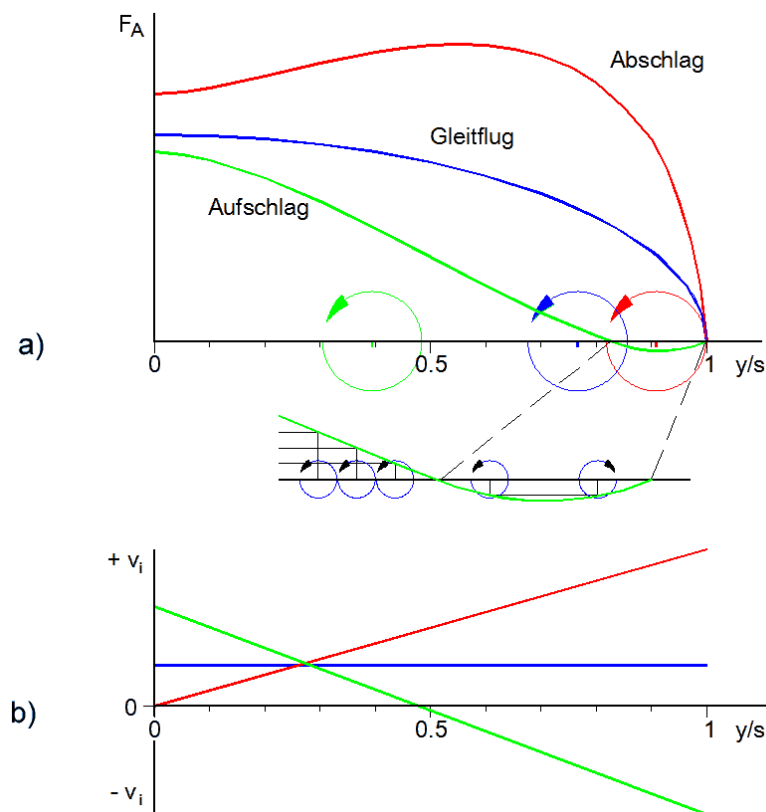


Bild 8 a) Mögliche Auftriebsverteilungen für Schlagflügel mit eingezeichneter Lage der jeweiligen Randwirbel. Um die Wirbelbildung auch im negativen Auftriebsbereich zu zeigen, ist dieser mit sehr kleinen Auftriebsstufen vergrößert dargestellt. Die Flügelspitze wird dabei von oben nach unten umströmt.

y/s = relative Halbspannweite

b) Dazu gehörige Abwindverteilungen.

In Bild 8 wurde für den Aufschlag eine Auftriebsverteilung gewählt, die im Bereich der Schwungfedern negativen Auftrieb aufweist. Das hilft den Auftrieb mehr in Richtung der Flügelwurzel zu verlagern. Diese Verteilung ähnelt im Übrigen ein wenig der Verteilungsform von Bild 6b.

Wichtig bei den hier gewählten Verteilungsformen ist, dass der geometrische Einstellwinkel an der Flügelwurzel immer konstant gehalten wird. Unter dieser Bedingung ergibt sich bei dem Rechenverfahren von R. T. Jones die Größenänderung des Gesamtauftriebes automatisch mit der Verlagerung des Auftriebs⁹.

In vorstehendem Bild 8 ist die Größenänderung der Auftriebsverteilungen nach meiner Einschätzung für Vögel zu stark. Vielleicht ändert sich der geometrische Einstellwinkel an der Flügelwurzel ja doch ein wenig¹⁰. Außerdem erzeugen die gewählten Verteilungen relativ viel Schub. Vögel benötigen den aber nur in besonderen Flugsituationen. Beim Reiseflug von Vögeln wird man die Verteilungen mehr an die des Gleitflugs annähern können. Natürlich gibt es auch Auftriebsverlagerungen ohne Größenänderung. Mit Flügelverwindung alleine ist das aber kaum zu schaffen¹⁰.

Vögel wenden sicherlich ähnliche Verteilungsformen an. Sie setzen dabei vielleicht auch spezielle Anstellwinkel- und Profiländerungen im Ellbogenbereich des Armflügels ein. Darüber ist aber hier nichts bekannt. Beim Schlagflug wird jedenfalls die Lage der Randwirbel in starkem Maße durch die Form der Auftriebsverteilung beeinflusst.

2.4 Der Schubstrahl der Schlagflügel

Die Änderung des Wirbelabstandes von der Flügelwurzel während einer Schlagperiode ist schon in Bild. 5 beim Flug der Nebelkrähe aufgefallen. Wenn man sich dieses Bild genauer ansieht, erkennt man, dass in der Rückansicht des fliegenden Vogels die Flügelspitze bzw. der Ansatzpunkt des Randwirbels am Flügel während einer Schlagperiode eine umlaufende bzw. kreisende Bewegung ausführt. Stellt man sich dazu noch die Vorwärtsbewegung des Vogels vor, so erkennt man räumlich gesehen die etwa schraubenförmige Gestalt des nach hinten ausgelegten Flügelrandwirbels.

Auch die Randwirbel eines Propellerblattes sind schraubenförmig angeordnet. Sie umwinden den Schubstrahl und sind ein wesentlicher Bestandteil von ihm. Gegenüber dem Propeller sind beim Schlagflügel die Windungen des Randwirbels lediglich weiter auseinandergezogen und der innere Randwirbel fehlt. Die Bahnlinie der Flügelspitze bzw. des Schlagflügelrandwirbels des Vogels hat also zumindest eine starke Ähnlichkeit mit dem Wirbelbild eines Propellers.

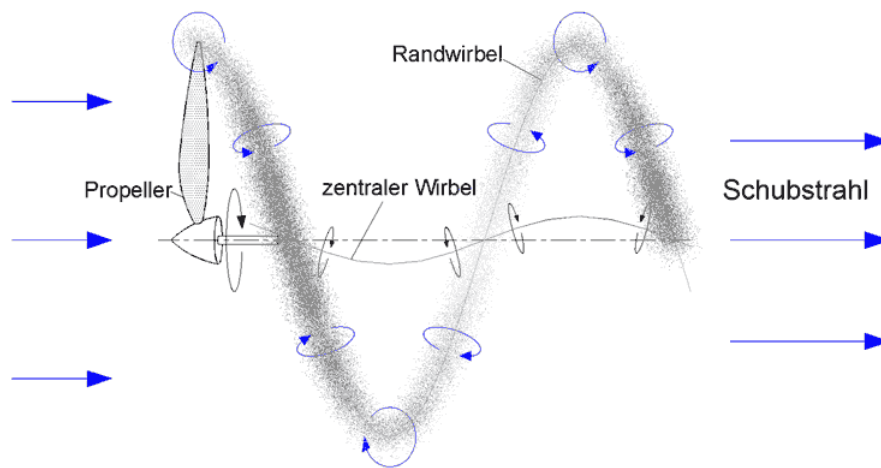


Bild 9 Wirbelbild eines einzelnen Propellerblattes.

Da an einem Propellerblatt der Auftrieb an beiden Blattenden immer auf null abfällt, hat es zwei Randwirbel. Der zentrale Wirbel entlang der Propellerachse ist hier zur besseren Übersicht nur durch eine Linie angedeutet. Er ist so stark wie der äußere Randwirbel.

Das Propellerblatt überstreicht während einer Umdrehung die Fläche des Schubstrahls. Auf ganz ähnliche Weise überstreicht beim Schlagflug der zwischen der Flügelwurzel und dem Randwirbel liegende Flügelabschnitt eine Fläche. Diese Strahlfläche des Schlagflügels ist aber veränderlich, da sich der Randwirbel längs der Spannweite verlagert.

Während einer ganzen Schlagperiode liegt die Strahlfläche zwischen den Endlagen des Schlagflügels und kann wie folgt schematisch dargestellt werden (siehe folgendes Bild 10). Diesen Darstellungen für ein Ornithoptermodell wurden Auftriebsverteilungen zu Grunde gelegt, die etwa denen in Bild 8 entsprechen. Die Berechnung erfolgte aber nur für einen Wirbelfaden einer mittleren Auftriebsstärke. Sie kann jedoch in grober Näherung auch stellvertretend für den ganzen Flügelrandwirbel stehen. Bei Berücksichtigung mehrere Wirbelfäden wird die Schubstrahlfläche kreisförmiger.

Die vom Flügel überstrichene Strahlfläche in Rumpfnähe wird von Auf- und Abschlag gemeinsam genutzt. Beim Aufschlag wird sie vom Randwirbel in entgegengesetzter Richtung durchdrungen wie beim Abschlag. Der Schubstrahl dieser Fläche ist also beim Aufschlag nach vorne gerichtet. Auf diese Weise wird dort der beim Abschlag erzeugter Schub beim Aufschlag wieder aufgehoben (zumindest bei gleicher Wirbelstärke). Nur die Differenzfläche von Auf- und Abschlag bleibt als Schubstrahl des Schlagflügels übrig.

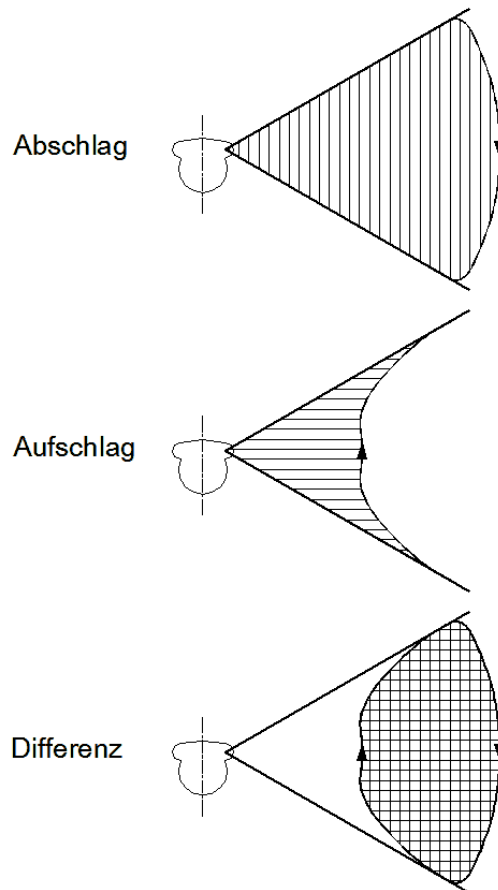


Bild 10

Ansicht auf einen Schlagflügel in Flugrichtung mit den schraffierten Flächen, die von dem Flügelabschnitt zwischen Flügelwurzel und Randwirbel überstrichen werden.

Die Differenzfläche von Auf- und Abschlag entspricht der Schubstrahlfläche des Schlagflügels.

Man könnte nun eine ganze Reihe von Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen den Schubstrahlen von Propeller und Schlagflügeln aufzählen. Wesentlich für die Schubstärke ist aber sicherlich in beiden Fällen die Größe der Querschnittsfläche des Schubstrahls. Beim Schlagflügel spielt dabei neben der Spannweite und dem Schlagwinkel insbesondere die Verlagerung des Auftriebs eine wesentliche Rolle. Für einen starken Schub beim Abschlag ist der Auftrieb möglichst nach außen zu verlagern. Der induzierte Widerstand steigt dabei aber stark an. Beim Aufschlag unterstützt negativer Auftrieb im Bereich der Flügelspitze das Bestreben, den positiven Auftrieb möglichst weit in Richtung der Flügelwurzel zu verlagern. Die nachteiligen Auswirkungen auf die Größe und Gleichmäßigkeit der Auftriebserzeugung sind aber immer zu beachten. Was für den Schub vorteilhaft ist, erweist sich für den Auftrieb meist als nachteilig und umgekehrt.

Die beiden Randwirbel eines ganzen Schlagflügels werden sich zusammen mit dem dazwischen liegenden Wirbelfeld nach unten bewegen. Die Schubstrahlen haben also hinten eine kleine Neigung nach unten. Wie dieses Wirbelfeld aber während der Schlagbewegung im Einzelnen aussieht und welche Auswirkungen es auf die Randwirbel hat, ist noch zu ergründen. Die primäre Aufgabe für die Schuberzeugung beim

Schlagflug ist die Auftriebsverlagerung. Die gleichzeitig sich ändernde Anordnung der Randwirbel ist nur ein äußeres Zeichen dafür.

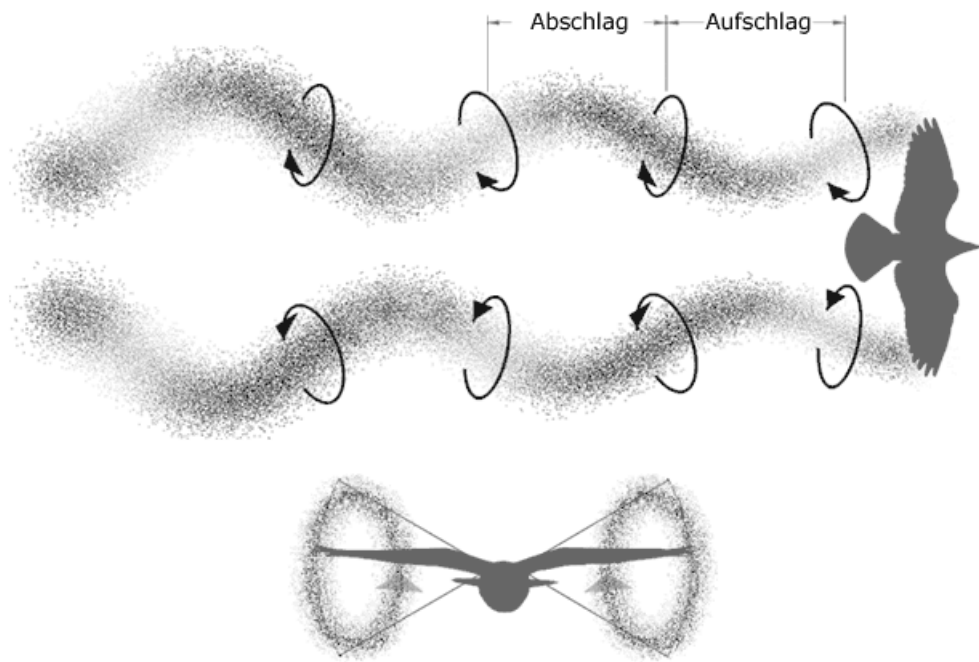


Bild 11 Die Schubstrahlen eines Vogels im Reiseflug

Für die Auftriebsverlagerung stehen den Vögeln zwei Verfahren zur Verfügung. Sie können die Flügelgestalt ändern und damit auch die Auftriebsverteilung (siehe Bild 5) oder sie lassen die Flügel gestreckt und ändern mit dem Anstellwinkelverlauf längs des Flügels nur die Auftriebsverteilung (siehe Bild 8). Sicherlich nutzen sie im Verlauf einer Flügelschlagperiode immer beide Möglichkeiten. Die damit in Zusammenhang stehende Verlagerung des Randwirbels wurde bei Vögeln schon festgestellt¹¹ (wie Bild 11).

Den Ornithoptern steht beim derzeitigen Stand der Technik für die Auftriebsverlagerung nur eine Möglichkeit zur Verfügung. Es ist die Änderung der Auftriebsverteilung am geraden Flügel durch geeignete Verwindung. Es gibt aber schon vielversprechende Ansätze für Schlagflügelkonstruktionen mit einer Abwinklung oder auch mit einer Schwenkbewegung¹² des Handflügels nach hinten. Beide Maßnahmen unterstützen die Auftriebsverlagerung auch durch die Formänderung des Flügels.

2.5 Fächerwirkung des Schlagflügels entlang der Spannweite

Für die Funktionsweise des Schubstrahls ist auch der kaum beachtete Übergang zwischen Auf- und Abschlag von Bedeutung. Dazu hat mir A. Piskorsch¹³ mal Zeitlupenfilme von

Schwänen und Störchen gezeigt, die mit der Blickrichtung von vorne oder hinten aufgenommen wurden. Dabei hat sich mir folgender Eindruck förmlich aufgedrängt.

Die Bewegung des Schlagflügels verläuft, etwas übertrieben ausgedrückt, etwa wie die einer Peitsche, deren Durchbiegungsmöglichkeit nach oben eingeschränkt ist. Der Flügelauflschlag beginnt mit dem Hochziehen des Armflügels. Gleichzeitig setzt eine nach unten gerichtete Abwinklung des Handflügels ein. Die dabei nur wenig belasteten Schwungfedern weisen zusätzlich nach unten. Sie geben dem Handflügel eine schwach gebogene Form. Während des Aufschlags läuft die Abwinklung, zumindest scheinbar, wie eine Welle von der Flügelwurzel zur Flügelspitze. Die kleinere Flügeldurchbiegung des Abschlags nach oben schließt sich harmonisch daran an. Die Wellenbewegung längs der Spannweite endet schon kurz nach dem Beginn des Abschlags. Dort liegt bereits die maximale Durchbiegung des Flügels und der Schwungfedern vor. Diese Flügelhaltung wird fast während des ganzen Abschlags beibehalten. In der unteren Flügelstellung setzt dann die Welle von neuem an der Flügelwurzel an. Insbesondere beim Startvorgang meint man förmlich ein Luftpaket unter dem Flügel zu sehen, das mit der Welle von innen nach außen geknetet wird. Man kann sich den ganzen Vorgang auch beim Schlagen mit den eigenen Armen und Händen vorspielen.

Die Wirkung dieses peitschenförmigen Bewegungsablaufes ist mit der eines Fischschwanzes, oder grob gesehen eben mit der eines Luftfächers zu vergleichen. Infolgedessen beschleunigt der Schlagflügel die Luft nicht nur nach hinten und unten sondern auch zur Seite. Bei Vögeln ändert sich auch der geometrische Einstellwinkel längs der Spannweite nicht so schlagartig wie bei dem meisten Ornithoptern mit Membranflügeln. Stattdessen läuft die Einstellwinkeländerung längs der Spannweite wellenartig mit der Flügelabwinklung mit.

Den zeitlichen und örtlichen Verlauf der Einstellwinkeländerung beim Aufschlag kann man an Hand der Filmbilder bei einem fliegenden Schwan¹⁴ gut erkennen. Sie wurden genau von vorne aufgenommen. Der Aufschlag beginnt mit der Formung eines großen Einstellwinkels an der Flügelwurzel. Der Handflügel nimmt daran nur stark verzögert teil. Erst während der Bewegung ab der Aufschlagmitte nimmt die Flügelverwindung die Gestalt an, die man allgemein beim Aufschlag erwartet. Der kräftige Auftrieb des Abschlags wird offensichtlich bereits am Anfang des Aufschlags, bei noch fast gestrecktem Flügel, vom Handflügel in Richtung der Flügelwurzel verlagert.

In der oberen Endlage erfolgt die Verlagerung in umgekehrter Richtung. Sobald der Armflügel die obere Endlage erreicht hat, nimmt er etwa die Einstellwinkelstellung des

Abschlags ein. Mit seiner starken Profilwölbung übernimmt er damit sicherlich einen großen Teil des Auftriebs. Der Armflügel wartet in dieser Haltung, bis der Handflügel seinen Aufschlag beendet hat. Diese Warten fehlt bei den bisherigen Ornithoptern mit Gelenkschlagflügeln. Erst zusammen mit der restlichen Aufschlagbewegung des Handflügels erfolgt der Aufbau des größeren Auftriebs im äußeren Flügelbereich. Nach dem Abschluss der Aufschlagbewegung bzw. dem Beginn der Abschlagbewegung wird er mit der Durchbiegung der Schwungfedern an der Flügelspitze erkennbar. Der Auftrieb bzw. sein Randwirbel werden also schon im Bereich der oberen Endlage von innen nach außen verschoben. Das ist gut für die Größe der Schubstrahlfläche.

Man kann die Auswirkung des Fächers auch in dem Bild vom Schubstrahl eines Vogels erkennen¹¹ (siehe ebenso Bild 11). Der Abstand der beiden Randwirbel hinter dem fliegenden Vogel wird immer größer, insbesondere beim Abschlag. Die Mittellinie des Schubstrahls weist dadurch etwas nach außen.

Das Spreizen der Randwirbel hinter dem Flügel entspricht einer scheinbaren Vergrößerung der Spannweite. Der induzierte Widerstand wird dadurch entsprechend kleiner. Erst weiter hinten wird sich der Doppelwirbel des ganzen Schlagflügels vielleicht wieder zusammenrollen.

2.6 Anfahrwirbel

Beim Übergang zwischen den beiden Schlagtakten wäre es gut, wenn beide Takte mit annähernd gleicher Auftriebsgröße arbeiten würden. Andernfalls kommt es bei jedem neuen Auftriebsanstieg zur Bildung eines Anfahrwirbels (siehe „Die aerodynamischen Grundlagen des Schwingenfluges“¹⁵ von A. Lippisch, 1938). Der wird nach seiner Entstehung nach hinten weggeblasen, bleibt aber über die freien Wirbel mit dem Flügel verbunden. Beim Abbau des Auftriebs bleiben dann auch diese Teile der Wirbelschleife zurück (siehe Bild 12). Die Erzeugung des Anfahrwirbels erfordert jedes Mal Energie. Eine Angleichung der Auftriebsgröße der beiden Takte führt also nicht nur zu kleineren Auf- und Abbewegungen des Modells, sondern auch zur Einsparung von Energie.

Der Nutzen eines guten Übergangs zwischen den beiden Schlagtakten ist in einem Rechenverfahren mit quasistationären Strömungsbedingungen allerdings nicht erkennbar. Unter stationären Bedingungen gibt es ja keine Anfahrwirbel.

Die Energie für den Anfahrwirbel kann man abschätzen. Dazu setzt man zunächst seine Länge mit der Länge des übrigen, hufeisenförmigen Wirbels ins Verhältnis. Dabei

entspricht die Länge des Hufeisenwirbels der mit dem induzierten Widerstand umgesetzten Energie. Der Anfahrwirbel ist kurz gegenüber dem Hufeisenwirbel. Außerdem

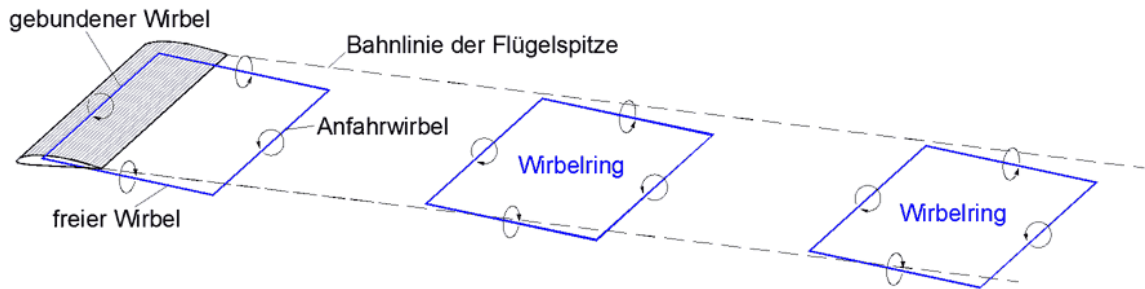


Bild 12 An ihrem Entstehungsort eingefrorene Wirbelringe entlang der Flugbahn bei zyklisch wechselndem Auftrieb. Beim Auftauen bewegen sich die Wirbelringe nach unten. Die Länge der Wirbelringe und ihr Abstand untereinander ist bezogen auf die Flügelspannweite stark verkürzt dargestellt.

ist nur der Auftriebsunterschied zwischen den beiden Schlagtakten maßgebend für die Stärke des Anfahrwirbels. Insgesamt ist also der Energieaufwand für den Anfahrwirbel relativ gering. Trotzdem sollte man bei Ornithoptern versuchen, die Auftriebsgröße der beiden Schlagakte zumindest annähernd anzugleichen.

3 Nutzung des Wirbelsystems beim Formationsflug

3.1 Nutzung des Aufwindes

An einem Flügel gibt es nicht nur die beiden Flügelrandwirbel und das Abwindfeld dazwischen, sondern auch eine Luftbewegung um die Flügelspitze herum nach oben. Direkt an der Flügelspitze gibt es also einen Aufwind. Eine weit verbreitete These vom Formationsflug der Vögel geht davon aus, dass dieser Aufwind des vorausfliegenden Vogels vom Nachflieger genutzt werden kann. Diese Vorstellung wird in der Regel immer nur mit den Randwirbeln an den Flügelspitzen im Gleitflug erklärt. Das ganze Wirbelsystem hinter dem Flügel wird aber praktisch nie in Betracht gezogen.



Bild 13 Ansicht einer fliegenden Gans und der Aufwind links und rechts davon.

Aus der Luftströmung um die Flügelspitzen entstehen hinter dem Flügel die Flügelrandwirbel. Diese wälzen sich gemeinsam mit der Abwindgeschwindigkeit v_i durch die

umgebende Luft nach unten. Zusammen bilden sie einen Doppelwirbel. In ihm ist die gesamte vom Flügel erfasste Luftmasse enthalten (siehe nächstes Bild 14). Durch seine Breite begrenzt der Doppelwirbel die Größe der einzelnen Randwirbel. Bei Großflugzeugen erreichen die Flügelrandwirbel Durchmesser, die etwa der Spannweite entsprechen¹⁶. Die Abwärtsbewegung des Doppelwirbels geht auch konform mit der Auftriebstheorie nach Newton.

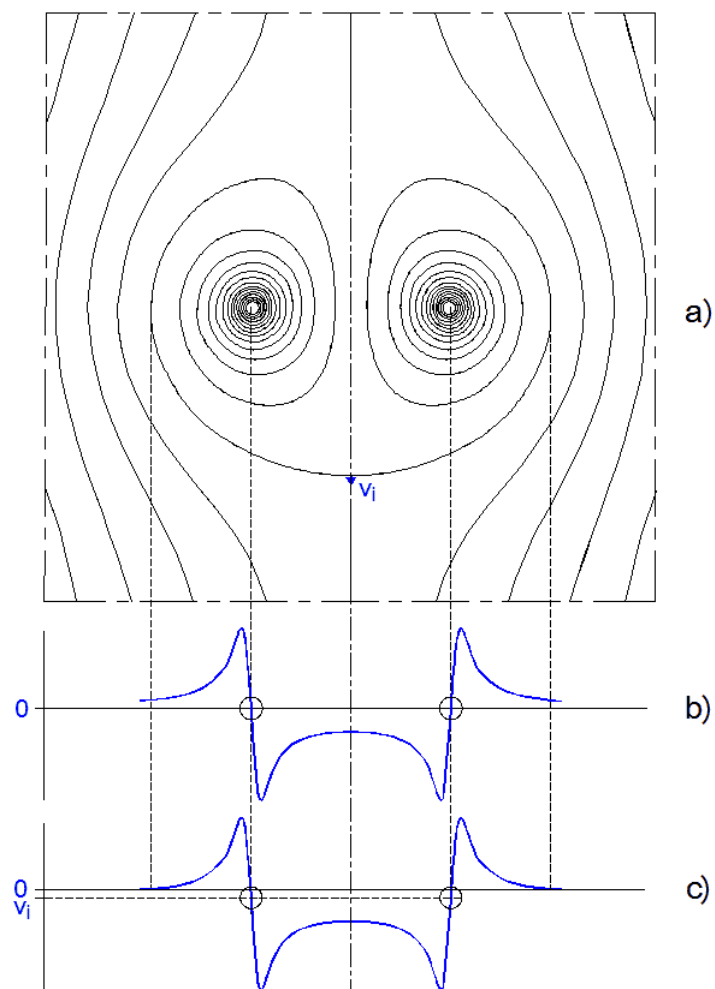


Bild 14 a) Querschnitt eines Doppelwirbels bei elliptischer Auftriebsverteilung in größerer Entfernung hinter dem Flügel
b) Abwindgeschwindigkeit v_i bezogen auf den Doppelwirbel.
c) Abwindgeschwindigkeit v_i bezogen auf den umgebenden Luftraum.

Jeder der beiden Randwirbel rollt an seiner Außenseite am umgebenden Luftraum nach unten. Hinter Flugzeugen die durch Wolken fliegen sieht man nur eine Wolkenschlucht in Spannweitenbreite, daneben aber keine Wolkenberge. Wohin soll sich der nachfliegende Vogel nun begeben, um von einem Aufwind seines Vorfliegers zu profitieren?

Bei der Auftriebsthese für den Formationsflug geht man davon aus, dass sich der Folgevogel mit einer Flügelspitze etwa in das Zentrum eines der Randwirbel seines Vorfliegers legt. Er befindet sich dann mit dem ganzen betreffenden Flügel im sich nach unten bewegendem Doppelwirbel seines Vorfliegers. Trotzdem hat der Nachflieger im äußeren Flügelbereich offensichtlich Aufwind (siehe folgendes Bild 15). Nahe dem Wirbelzentrum ändert sich jedoch schon wenige Zentimeter oberhalb oder unterhalb der Wirbelachse die Strömungsrichtung beträchtlich.

Der Nachflieger wird also auf einer Seite angehoben und damit zur Seite gedrängt. Zum Ausgleich muss er gegensteuern. Beim Aufschlag kehrt sich, je nach Auftrieb bzw. Schubbedarf, die Abwindrichtung an der Flügelspitze auch um (siehe z. B. Bild 8b). Auf welche Weise bei einseitigem Anheben insgesamt ein Nutzen zustande kommen soll, ist nicht ohne weiteres erkennbar.

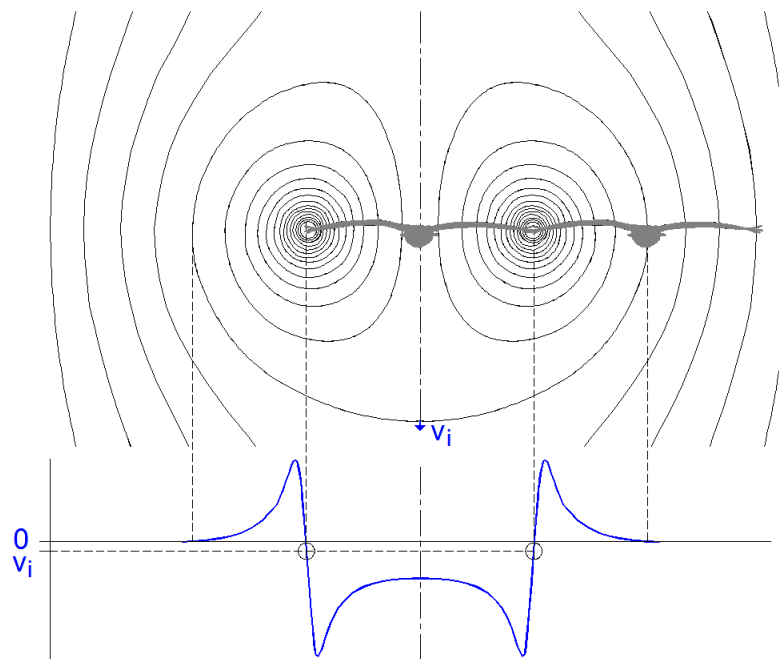


Bild 15 Formationsflug im Aufwind des Vorfliegers (links) im Gleitflug. Darunter ist der Verlauf der Abwindgeschwindigkeit des Vorfliegers, bezogen auf den umgebenden Luftraum dargestellt. Das natürliche Bestreben der beiden Wirbel sich einander anzunähern ist hier vernachlässigt (Abstand = $0,78 \times$ Spannweite, siehe Bild 8a, Gleitflug).

Auch andere Anordnungen des Nachfliegers gegenüber dem Vorflieger führen bei einem einfachen Doppelwirbel nicht weiter. Wahrscheinlich fliegen Vögel deswegen im Gleitflug über längere Strecken nicht in einer Formation. Der Formationsflug sollte also möglichst durch Eigenschaften des Schlagfluges erklärt werden.

3.2 Widerstandsminderung

Eine andere These über den Formationsflug geht von der Vorstellung aus, dass der Nachflieger die Stärke eines eigenen Randwirbels verringern kann. Er muss nur den Ausgangspunkt seines eigenen Flügelrandwirbels in dem auf ihn zukommenden Randwirbel seines Vorfliegers platzieren. Durch die entgegengesetzte Rotationsrichtung beider Randwirbel werden die Wirbelstärke und damit der induzierte Widerstand beim Folgevogel reduziert (siehe Bild 16).

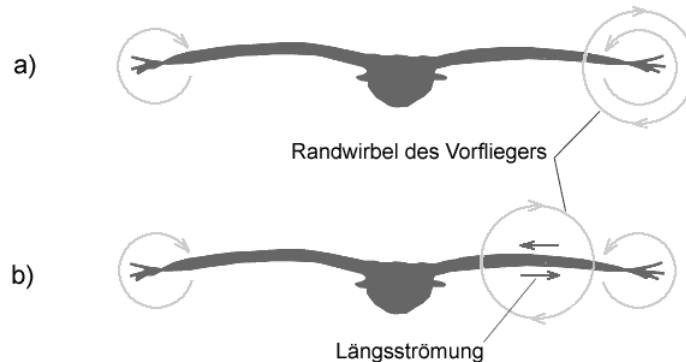


Bild 16 a) Gegenläufig rotierende Randwirbel bei einem Formationsflug zur Reduzierung des induzierten Widerstandes.
b) Reduzierung der Querströmung an einem Flügel durch Nutzung des Randwirbels vom Vorflieger.

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass der seitliche Abstand keine allzu große Bedeutung hat. Der Effekt ist auch dann noch wirksam, wenn der Randwirbel des Vorfliegers zwar im Flügelbereich, aber nur in der Nähe des Ausgangspunktes des eigenen Flügelrandwirbels liegt. In diesem Falle werden die Querströmung am Flügel und damit der induzierte Widerstand kleiner. Allerdings ist letztere Anordnung nicht ratsam. Der äußere Flügelbereich des Folgevogels liegt ja dann im Abwindbereich des Vorfliegers, zumindest bei dessen Flügelabschlag (siehe Bild 15).

Im Gleitflug ist hier die Anordnung der beiden Vögel die gleiche wie bei der Auftriebsthese. Der Folgevogel spürt also den einseitigen Auftrieb, gleichzeitig wird der induzierte Widerstand auf dieser Flügelseite kleiner. Für einen Geradeausflug muss der Folgevogel halt dauernd gegensteuern. Wo ist da der Vorteil? Auch dieses Verfahren wird von den Vögeln im Gleitflug nicht genutzt.

Beim Schlagflug führt jeder Flügelrandwirbel in Flugrichtung gesehen eine kreisende Bewegung aus (siehe Bild 5 und 10). Die mittlere Bahnlinie und damit auch der Querschnitt des Schubstrahls haben etwa die Form einer Ellipse. Für den Folgevogel ist es

nun möglich, den eigenen Schubstrahl und den Schubstrahl seines Vorfliegers miteinander zur Deckung zu bringen (siehe folgendes Bild 17).

Die Bahnlinien der beiden Randwirbel, die dann den gemeinsamen Schubstrahl formen, sind aber nicht deckungsgleich. Wie aus Bild 5 und 10 ersichtlich, umkreisen sie den gemeinsamen Schubstrahl gegenläufig. Sie kreuzen sich lediglich zweimal in einer Schlagperiode. Beim Schlagflug ist es also nicht möglich, die Randwirbel von Vor- und Nachflieger deckungsgleich übereinander zu legen. Man kann also keinen Nutzen aus den gegenläufig rotierenden Randwirbeln ziehen.

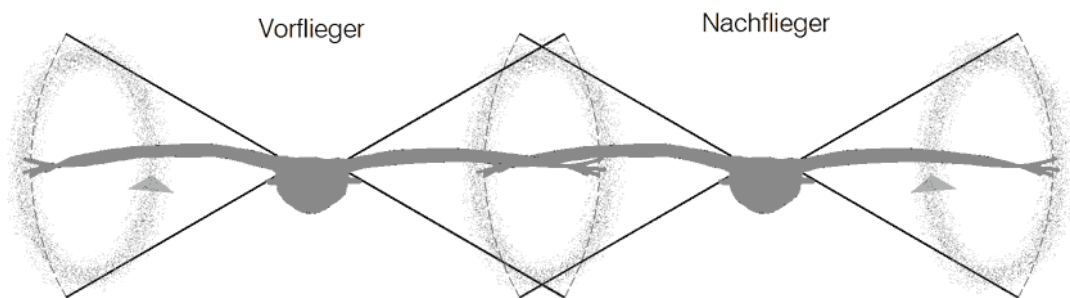


Bild 17 Anordnung der Vögel mit einem vereinigten Schubstrahl (mittlere Randwirbel)

Ob die Hintereinanderschaltung der beiden Schubstrahlen, ähnlich wie bei zwei gegenläufigen Propellern, nennenswerte Vorteile bringt, ist mir nicht bekannt. Insbesondere der hintere Propeller müsste dadurch besser funktionieren. Das wäre dann eine weitere These. Die Anordnung der Vögel in Bild 17 ist jedenfalls relativ häufig in V-Formationen der Vögel zu sehen.

3.3 Der Ritt auf dem Schubstrahl

Zusammen mit der Schubstrahltheorie des Schlagflügels ergibt sich hier noch eine andere Möglichkeit für den Wirkmechanismus beim Formationsflug. Der Nachflieger könnte sich mit seinem Körper auch mittig über den Schubstrahl legen (siehe Bild 18). Auf dessen Außenseite besteht ja eine Strömungsrichtung nach vorne (siehe Bild 9). Dies könnte der Nachflieger zumindest im Rumpfbereich als Rückenwind nutzen. Der Nachflieger liegt aber dann womöglich im Bereich des sich nach unten bewegenden Doppelwirbels des voraus fliegenden Vogels. Außerdem ist die Kontaktfläche zwischen dem Wirbel und dem Nachflieger sehr klein und besteht nur kurzzeitig.

Bei der Überprüfung all dieser Thesen an Hand von Bildern vom Formationsflug der Vögel ist zu berücksichtigen, dass die Mittellinie der Randwirbel und des Schubstrahls durch die Aufweitung der Randwirbel nicht genau in Flugrichtung liegt. Sie weisen

hinter dem Vogel ein wenig nach außen. Der Winkel ist aber je nach Vogelart sicher unterschiedlich.

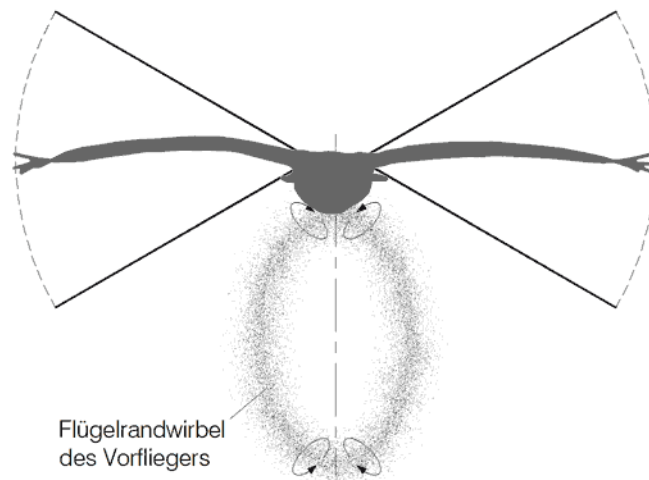


Bild 18 Der Ritt auf dem Schubstrahl (Ansicht von hinten).

Vögel nutzen vielleicht mehrere der hier beschriebenen Möglichkeiten, je nach Horizontalflug, Steigflug oder Schnellflug. Auch könnte jede Vogelart eine andere Variante bevorzugen und optimieren. Auf Bildern vom Formationsflug passen jedenfalls immer nur wenige Vögel einer Formation in eines der hier beschriebenen Schemen. Man könnte vielleicht die eine oder andere These erhärten oder ausschließen, wenn man nicht nur vertikale sondern auch seitliche Bilder von der gleichen V-Formation hätte. Dann ließe sich zumindest abschätzen, in welcher Höhe der Nachflieger durch den Randwirbel seines Vorfliegers fliegt. Beim Thema „Flügelrandwirbel von Schlagflügeln“ sind jedenfalls noch viele Fragen offen.

4 Quellenangaben

- ¹ Oehme Hans. Über den Kraftflug großer Vögel. Beiträge zur Vogelkunde. Band 11, Seite 1-31, Aula-Verlag, Wiebelsheim, Leipzig, 1965; siehe <http://www.ornithopter.de/literatur.htm#oehme>
- ² Oehme Hans. Vom Flug des Habichts, *Accipiter gentilis* (L.). Ann. Naturhist. Mus. Wien 88/89 B, 67-81, Wien, 1986; siehe <http://www.ornithopter.de/literatur.htm#oehme>
- ³ 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.
- ⁴ Lilienthal Otto. *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst*. R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin, 1889
- ⁵ v. Holst Erich. *Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen. Gesammelte Abhandlungen*, Band II, R. Piper & Co Verlag, München, 1979

- ⁶ 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, Sept. 1950; siehe <http://ornithopter.de/literatur.htm#jones>
- ⁷ Rübiger Horst. Rechenprogramm „Orni 1“; siehe <http://www.ornithopter.de/rechnung.htm>
- ⁸ Jones, Robert T. 1980 Wing flapping with minimum energy. Aeronautical Journal 84, page 214-217, London, July 1980; siehe <http://www.ornithopter.de/literatur.htm#jones>
- ⁹ Rübiger Horst. Wie Ornithopter fliegen, Aerodynamik und Dynamik großer Schlagflügelmodelle, Selbstverlag Nürnberg, 2001; siehe <http://www.ornithopter.de/handbuch.htm>
- ¹⁰ Rübiger Horst. Auftrieb beim Flügelaufschlag. Nürnberg, 2015, <http://www.ornithopter.de/literatur.htm#raebiger>
- ¹¹ Rayner, J. M. V. (1993). On aerodynamics and the energetics of vertebrate flapping flight. Cont. Math. 141, 351 -400; siehe <http://jeb.biologists.org/content/205/10/1389.full> the Fig.1B)
- ¹² Dr. James Hubbard Jr. and Aimy Wissa. Passive wing morphing for improved steady level flight in avian scale ornithopters, University of Maryland Morpheus Lab, Flapping Wings, the ornithopter zone newsletter, issue summer 2014; siehe <http://www.ornithopter.org/newsletter.shtml>
- ¹³ Piskorsch Adolf. Bewegte Schwingen. Selbstverlag, Sontheim an der Benz, 1975; siehe <http://www.ornithopter.de/literatur.htm#piskorsch>
- ¹⁴ Piskorsch Adolf, Animation von Bildern seiner Filmaufnahmen http://www.ornithopter.de/grafik/prinzip/schwan_gr.gif
- ¹⁵ Lippisch Alexander. Die aerodynamischen Grundlagen des Schwingenfluges. Schwingenflugmodell des NSFK, Seite 18-32, Verlag unbekannt, Berlin 1938 <http://www.ornithopter.de/literatur.htm#lippisch>
- ¹⁶ Dubs Fritz. Aerodynamik der reinen Unterschallströmung. Birkhäuser Stuttgart, Basel, Boston, 1979.