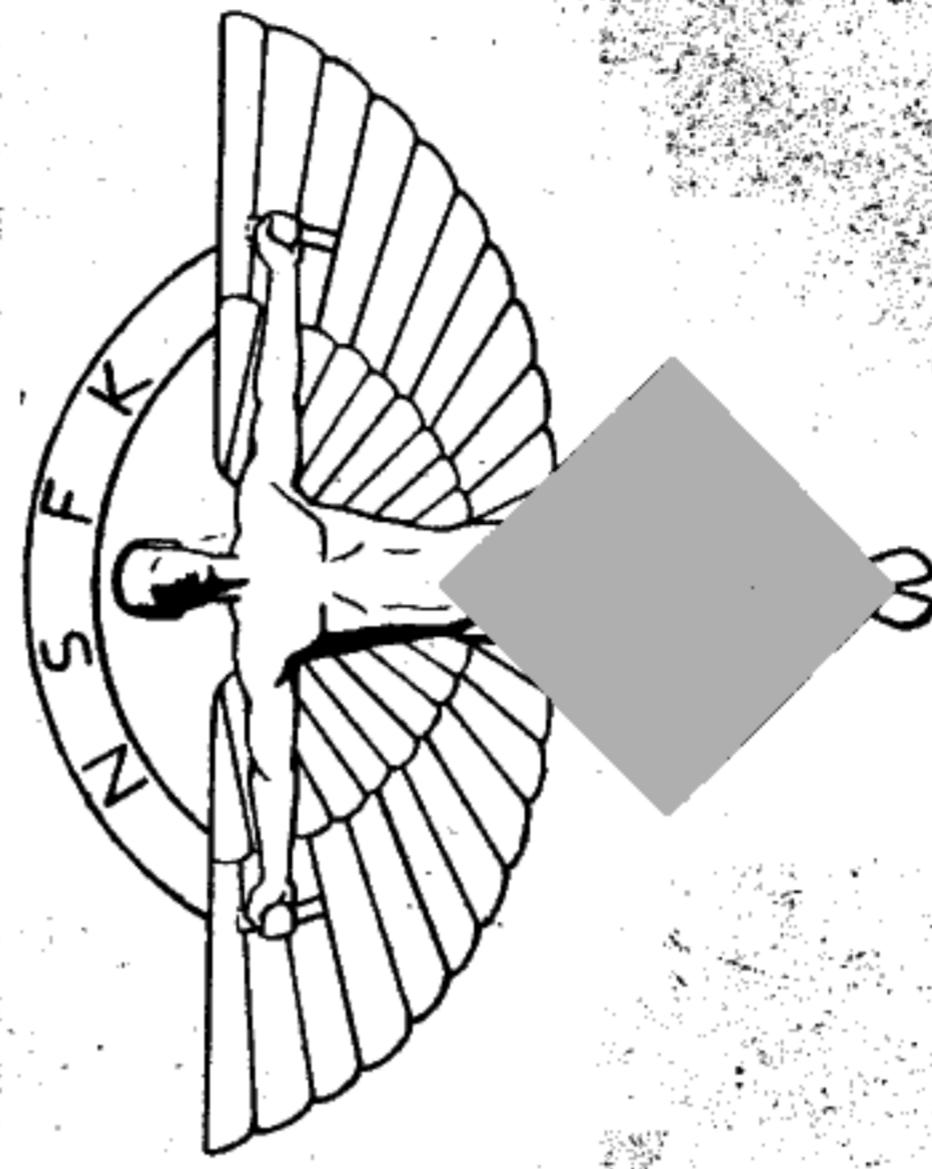


Gehwingenflugmodell des **DRÖG**

von Allerander Stippitsch



Berlin 1938

3. Die aerodynamischen Grundlagen des Schwingenfluges.

Der Allgemeine Gipfelflugh

Die Schlagbewegung des Tragflügels liefert, wie die Beobachtung zeigt, eine Vortriebskraft, die in gleicher Weise wie der Lufthaubenschub den im Fluge entstehenden Stirnwiderstand überwindet und dadurch die zum Fliegen notwendige Fluggeschwindigkeit dauernd aufrecht erhält. Wir wissen, daß der Vortrieb einer Lufthaubenebene dadurch entsteht, daß die Blätter eine etwa senkrecht zu ihrer Ebene stehende Luftrichtung erzeugen, so daß die in Flugrichtung wirkende Komponente dieser Luftrichtung einen Schub und die in Drehrichtung wirkende Komponente einen Drehwiderstand erzeugt (Abb. 11). Unter gleichbleibenden Betriebsverhältnissen wird diele Kraft an der Lufthaube stets die gleichen und lassen sich in gleicher Weise erfassen wie die Kräfte an einem Flügel, der unter gleichem Anstellwinkel unter gleichbleibender Geschwindigkeit bewegt wird. Wir haben also bei der Lufthaube wie beim Tragflügel „stationäre Strömungsverhältnisse“.

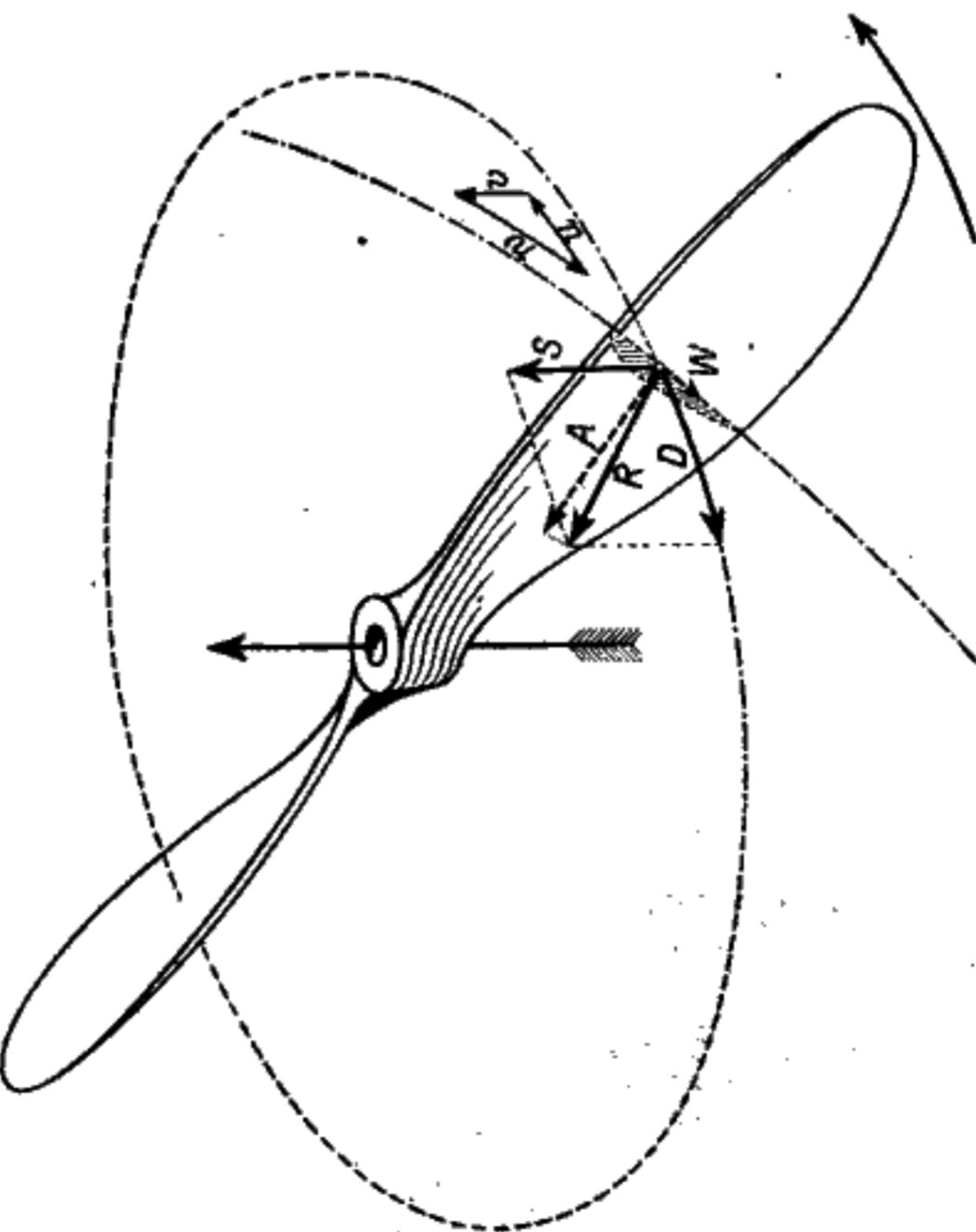


Abb. 11: Die Entstehung der Vortriebskraft an der Lufthaube.
Beim Tragflügel liegen die Verhältnisse insfern völlig anders, als hier durch die Zuf- und Abbewegung bei gleichzeitigem Vorwärtsschlag ein dauernder periodischer Wechsel der Anströmungsrichtung vor sich geht. Denken wir uns also die Bewegung, die ein Flügelquerschnitt ausführt, in einer Ebene dargestellt, die in Flugrichtung liegt und parallel zur Symmetrieebene des Flugzeugs ist, so erhalten wir

als Bahnturbe dieses betreffenden Flügelchnittes eine Wellenlinie. Führt der Tragflügel lediglich eine reine Zuf- und Abbewegung aus, so hat diese Wellenlinie die Gestalt der bekannten Sinusturbe. Wird der Tragflügel dagegen kreisend auf und ab bewegt, so erhalten wir eine Zykloidaturbe. Dazwischen liegende Bewegungsarten liefern Bahnturben, die beispielweise einen flacheren Niederflügel und einen stellen Zufschlag ergeben.
Um das Zustandekommen des Vortriebs eines Tragflügels in seinem Grundzügen zu erkennen, wollen wir den einfachsten Fall der Tragflügelbewegung durch reines Zuf- und Abschlagen im harmonischen Folgebetrieb, so daß wir die von dem betreffenden Profil durchlaufene Bahn als eine reine Sinusturbe annehmen können.

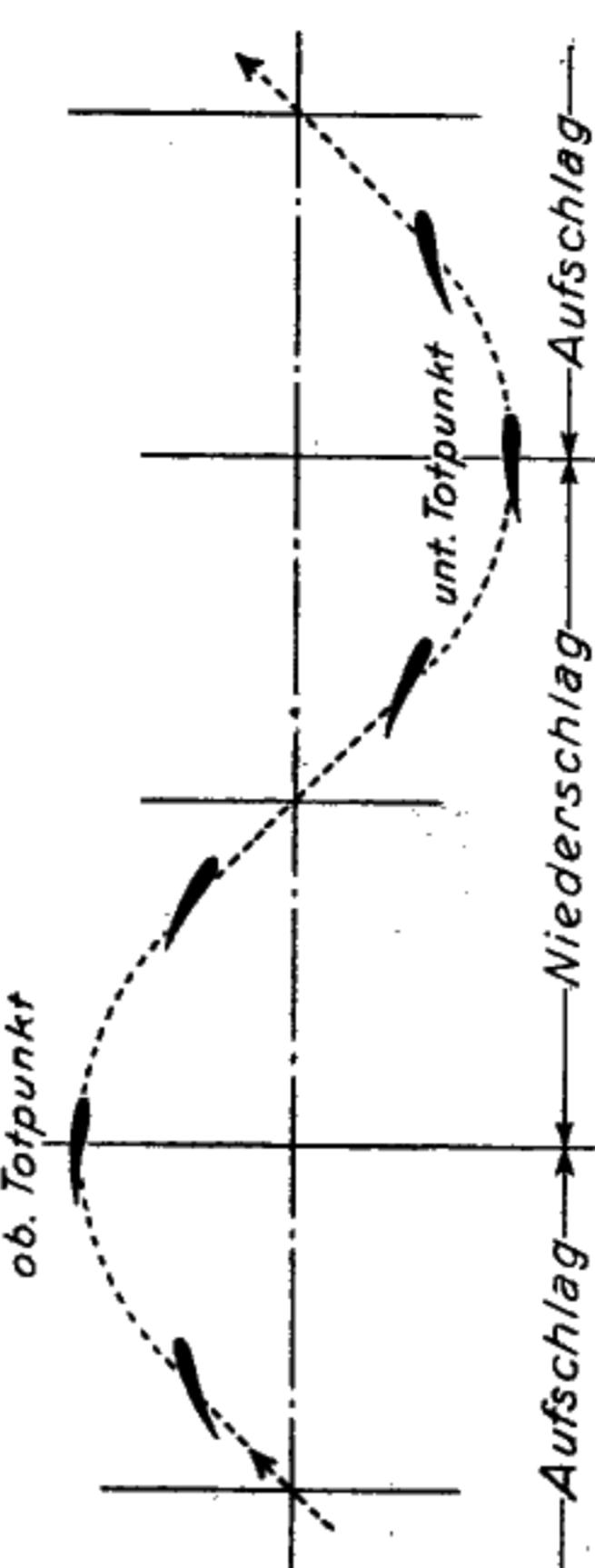


Abb. 12: Die Bahnturbe eines Tragflügels.
In Abb. 12 ist ein Teil dieser Bahnturbe dargestellt, so daß wir den Weg während eines vollen Zuf- und Niederflügels verfolgen können. Von der Stellung des Tragflügels in der Mittellage bewegt sich die Schwingung aufwärts bis zum oberen Totpunkt, lehrt dann die Bewegungsrichtung um und läuft über die Mittellage zum unteren Totpunkt, wo sich die Bewegungsrichtung wiederum ändert, so daß der Tragflügel in die Zufangslage zurückkehrt. Der erste Teil der Bahnturbe bis zum oberen Totpunkt gehört zum Zufschlag, dann folgt vom oberen bis zum unteren Totpunkt der Niederflügel, und das letzte Stück der Bahnturbe ist wiederum der Beginn des Zufschlages.
Wir wollen bei unserer Betrachtung davon ausgehen, daß der betreffende Tragflügel in der Mittellage bzw. in der Zufangstellung keinen Zuftrieb erzeugt. Der Tragflügel würde also beispielsweise au einem Tragflügelchnitt in der Mittellage befinden, wie er sich an meinen Modellen befindet und dessen Einstellung so vorgenommen ist, daß der Tragflügel selbst keinen Zuftrieb mehr erzeugt. Bewegt sich das Profil aus der Zufangslage nach oben, so wird es von der Luft in Richtung der durchlaufenen Bahnturbe angeströmt, d. h. es wird entsprechend unserer Darstellung in Abb. 12 auf dem Wege bis zum oberen Totpunkt unter negativen Anstellwinkeln angeblasen. Demnach

muss das Profil auf diesem Teil des Weges negativen Auftrieb liefern.

Um oberen Sotpunkt ist die Umklasrichtung die Flugrichtung, d. h. der Anstellwinkel wird Null, und auf dem nun beginnenden Niederschlagsweg erhalten wir einen bis zur Mittelstellung abnehmenden und dann wieder abfliegenden positiven Anstellwinkel. Auf diesem Teil des Weges muss das Profil also auch positiven Auftrieb liefern. Um unteren Sotpunkt wird der Anstellwinkel wiederum Null, und es beginnt der Aufschlag, bei dem der Anstellwinkel in negativer Richtung bis zur Mittellage ansteigt und dann wieder bis zum oberen Sotpunkt abflingt.

Die vier periodischen Wechsel des Anstellwinkels beim Schlagflügel muss eine periodische Veränderung des Auftriebes zur Folge haben. Wir wollen nun überlegen, in welcher Weise sich diese wechselnden Auftriebskräfte als Vortrieb auswirken können. Das Schräglag von oben angeklasste Profil (Abb. 13) erzeugt eine negative Auftriebskraft, die auf der Anströmungsrichtung senkrecht stehen muss. Gleichzeitig tritt ein dem Auftrieb entsprechender Widerstand ein.

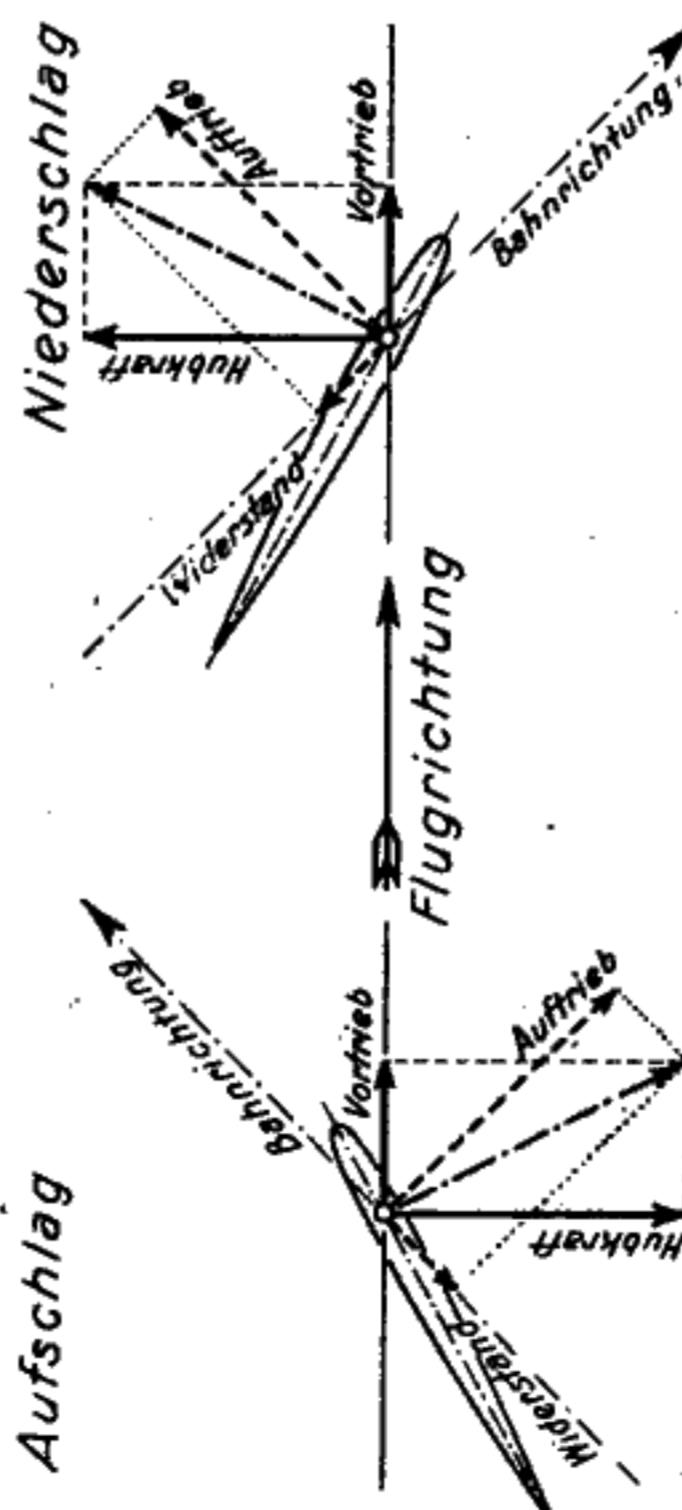


Abb. 13: Die Kräfte an einem Schlagflügelprofil beim Aufschlag. Beide Kräfte liefern eine Gesamtluftkraft, die wir nun in eine Kraft in Flugrichtung und eine Kraft senkrecht zur Flugrichtung zerlegen, d. h. es ist in Bezug auf Abb. 12 die Zahl der um unserer Bahnrücke. Die Komponente in dieser Richtung liefert also einen Vortriebzug, während die dazu senkrechte Komponente eine die Schlagbewegung hemmende Luftkraft darstellt. Die vordärtsziehende Komponente wollen wir als Vortrieb bezeichnen, die dazu senkrechte Komponente als Hubkraft. Obwohl diese Bezeichnungen absichtlich, um dadurch klar zu unterscheiden gegenüber Auftrieb und Widerstand, weil diese beiden Komponenten der gesamten Luftkraft stets auf die Umklasrichtung

liefern dann diese Kräfte, auf die Bewegung des ganzen Flugzeugs beigogen, die Vortriebs- und Hubkraft.

Bei Umklasierung an den oberen Sotpunkt bringt sich der negative Anstellwinkel und wird schließlich Null, so daß in dieser Stellung der Flügel lediglich einen Widerstand entgegen der Bewegungsrichtung liefert.

Der Niederschlag geht nun mehr mit positivem Anstellwinkel vor sich, und wir erhalten demnach eine Umkehr der Kräfte gegenüber der Aufschlagstellung (Abb. 14). Der Schräglag von unten angeklasste Flügel erfährt senkrecht zur Bewegungsrichtung einen Auftrieb und in der Bewegungsrichtung einen Widerstand, die zu einer Gesamtluftkraft zusammengefaßt werden können, die schräg nach oben vorne gerichtet ist. Diese Gesamtkraft läßt sich dann wiederum in eine Vortriebskomponente in Flugrichtung und eine Hubkraftkomponente in senkrechter Richtung zerlegen.

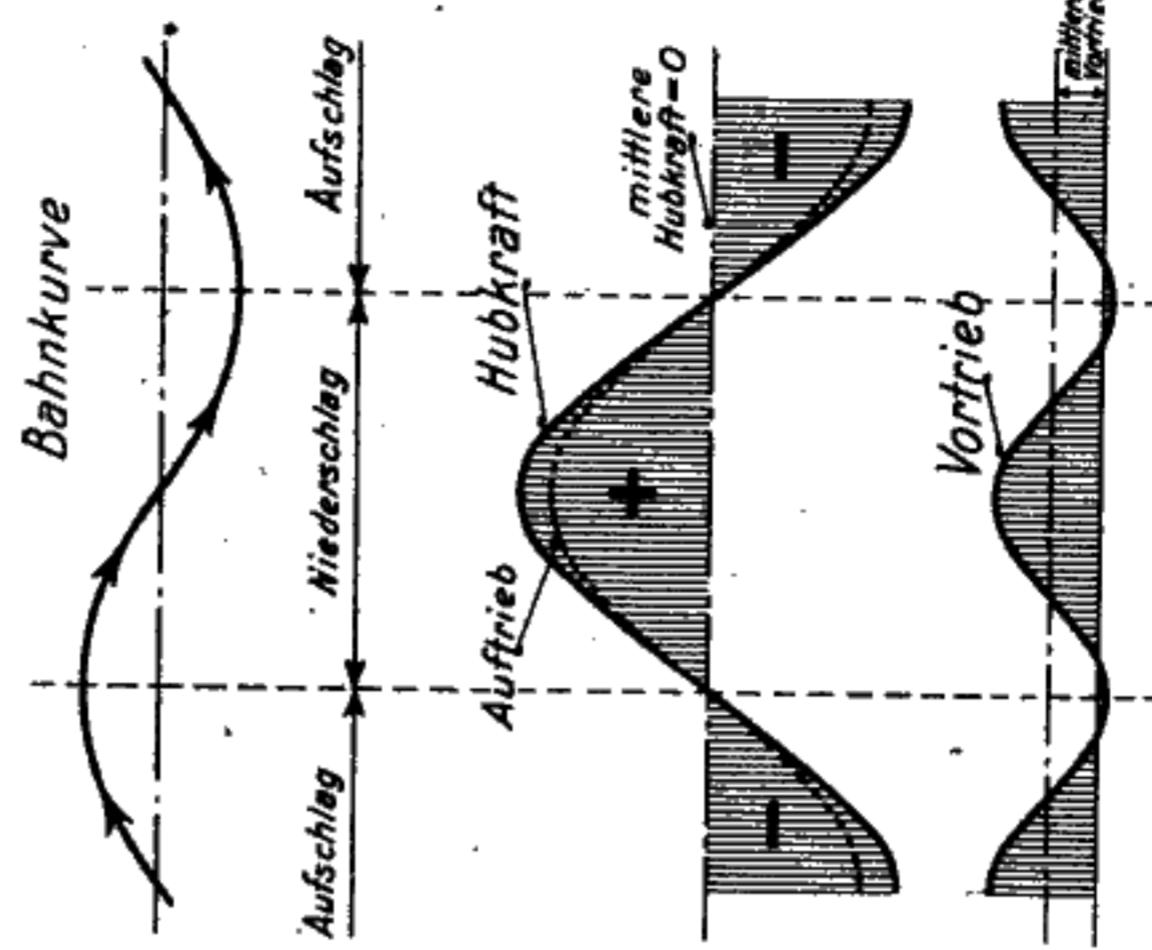


Abb. 14: Die Kräfte an einem Schlagflügelprofil beim Niederschlag. Beide Kräfte liefern eine Gesamtluftkraft, die wir nun in eine Kraft in Flugrichtung und eine Kraft senkrecht zur Flugrichtung zerlegen, können. Die Flugrichtung ist hierbei als Waagerechte angenommen, d. h. es ist in Bezug auf Abb. 12 die Zahl der um unserer Bahnrücke. Die Komponente in dieser Richtung liefert also einen Vortriebzug, während die dazu senkrechte Komponente eine die Schlagbewegung hemmende Luftkraft darstellt. Die vordärtsziehende Komponente wollen wir als Vortrieb bezeichnen, die dazu senkrechte Komponente als Hubkraft. Obwohl diese Bezeichnungen absichtlich, um dadurch klar zu unterscheiden gegenüber Auftrieb und Widerstand, weil diese beiden Komponenten der gesamten Luftkraft stets auf die Umklasrichtung

tung beugen müssen. Ursache der schrägen Umklasrichtung liefern dann diese Kräfte, auf die Bewegung des ganzen Flugzeugs beigogen, die Vortriebs- und Hubkraft.

Bei Umklasierung an den oberen Sotpunkt bringt sich der negative Anstellwinkel und wird schließlich Null, so daß in dieser Stellung der Flügel lediglich einen Widerstand entgegen der Bewegungsrichtung liefert.

Der Niederschlag geht nun mehr mit positivem Anstellwinkel vor sich,

und wir erhalten demnach eine Umkehr der Kräfte gegenüber der Aufschlagstellung (Abb. 14).

Der Schräglag von unten angeklasste Flügel erfährt senkrecht zur Bewegungsrichtung einen Auftrieb und in der Bewegungsrichtung einen Widerstand, die zu einer Gesamtluftkraft

zusammengefaßt werden können, die schräg nach oben vorne gerichtet ist.

Diese Gesamtkraft läßt sich dann wiederum in eine Vortriebskomponente in Flugrichtung und eine Hubkraftkomponente in senkrechter Richtung zerlegen.

Abb. 15: Schlagflügeldiagramm einer Schwinge ohne mittleren Zutrieb. oben: Die der Bestimmung der Kräfte zugrunde gelegte Bahnrücke, Mitte: Verlauf des Zutriebes und der Hubkraft während einer vollen Schwingung, unten: Verlauf der Vortriebswirkung der Schwinge. Betrachten wir also den Verlauf der periodisch wechselnden Luftkräfte während eines ganzen Flügelfschlages, so können wir diesen Verlauf in Form der Abb. 15 darstellen. Wir fragen also längs des

Flugweges die an jeder Stelle wirkende Auftriebskraft auf und können dann unter Berücksichtigung des jeweils zugehörigen Widerstandes durch einfache Kräfteberechnung die an jeder Stelle des Flugweges wirkenden Zuströme- und Hubkräfte bestimmen. Die Verteilung dieser Kräfte längs des Flugweges zeichnen wir ebenfalls als Kurven auf und erhalten so eine Darstellung, die man als Schlagflügelchaubild bezeichnen kann.

Bestimmen wir nun den Gleichgewichtshalt der von den Kurven und den zufließenden eingeschlossenen Stoffen und berechnen daraus die mittlere Höhe, so erhalten wir die während dieser Fluggeschlagbewegung erzeugten mittleren Kräfte. Diese Mittelwerte sind ebenfalls in der Chaubildung eingetragen.

Der Wirkungsgrad, mit dem der Zuströme erzeugt wird, ist gegeben durch das Verhältnis von Zuströme mal Fluggeschwindigkeit zu Hubkraft mal Schlaggeschwindigkeit. Unter Schlaggeschwindigkeit versteht man hier die vom Zuströme erzeugte Zuströmgeschwindigkeit der Schwinge, denn die vom Zuströme ausgewöhlte Kraft ist der Hubkraft entgegengesetzt und die gegen die Hubkraft geleistete Arbeit stellt die Zuströmearbeit dar.

Ich will hier auf die Zuströmeleitung des Zuströme wortungsgrades nicht näher eingehen, da dies zu weit führen würde. Ich möchte lediglich auf das Ergebnis eingehen, welches besagt, daß der Wirkungsgrad bei einem Schlagwinde von etwa 45° am günstigsten ist. Hierbei bezeichnete ich mit Schlagwinde den Winkel zwischen der Bahnkurve des Flügels und der Flugrichtung des ganzen Modells. Nun tritt bei der Schlagbewegung ein dauernder Wechsel dieses Schlagwinde ein. Wir müssen also einen Mittelwert auf dem Niederflügel und der Chaubildung übernehmen, der im wesentlichen mit dem geraden Stück der Chaubildung übereinstimmt. Die mittlere Neigung zwischen zwei Sotpunktstellungen ist bei einer Bahnkurve, die eine reine Sinuslinie darstellt, etwa 64 % der größten Schlagneigung beim Durchgang durch die Mittellage. Wollen wir also einen mittleren Schlagwinde von 45° erreichen, so muß der Schlagwinde in der Mittellage 58 Grad betragen. Wir müßten demnach bei der günstigsten Bewegung eines Schlagflügels darauf achten, daß wir die Frequenz und die Schlagweite (Zimpfritude) so auf die Fluggeschwindigkeit abstimmen, daß der Flügel in seinen wirtschaftlichen Zellen eine Bahnkurve mit der oben festgelegten günstigen mittleren Neigung durchläuft. Diejenige Bahnkurve aber, die als größte Bahnneigung 58° aufweist, heißt als Verhältnis zwischen der Länge einer Sotlung einer vollen Schwingung und der Höhe dieser Schwingung den Wert 2 : 1.

Betrachtet man die Betriebsverhältnisse einer Schwinge, die in der Null-Lage auftriebssbelastet ist, so erhält man in dem Schlagflügel-Chaubild einen Zuströmeberlauf, der um einen entsprechenden poli-

tiven Mittelwert schwankt. Dadurch wird auch der Mittelwert der Hubkraft positiv, so daß die vom Zuströme zu überwindende Hubkraft beim Niederflügel größer und beim Aufschlag kleiner ist als beim Betrieb der Schwinge ohne mittleren Zuströme. Die beim Niederflügel aufzuhaltende augenhafte Leistung fordert also ein größeres Motordrehmoment, während beim Aufschlag die Schwinge schon durch die Hubkraft in die obere Sotpunktlage gehoben wird, zum mindesten aber eine sehr kleine Leistung zum Aufschlag notwendig ist. Da der Motor ein konstantes Drehmoment liefert, muß man ihn so dimensionieren, daß er die große Niederflügelarbeit zu überwinden imstande ist. Um Aufschlag läuft er dann praktisch leer, denn seine Leistung kann nicht in Zuströme umgewandelt werden (Abb. 16).

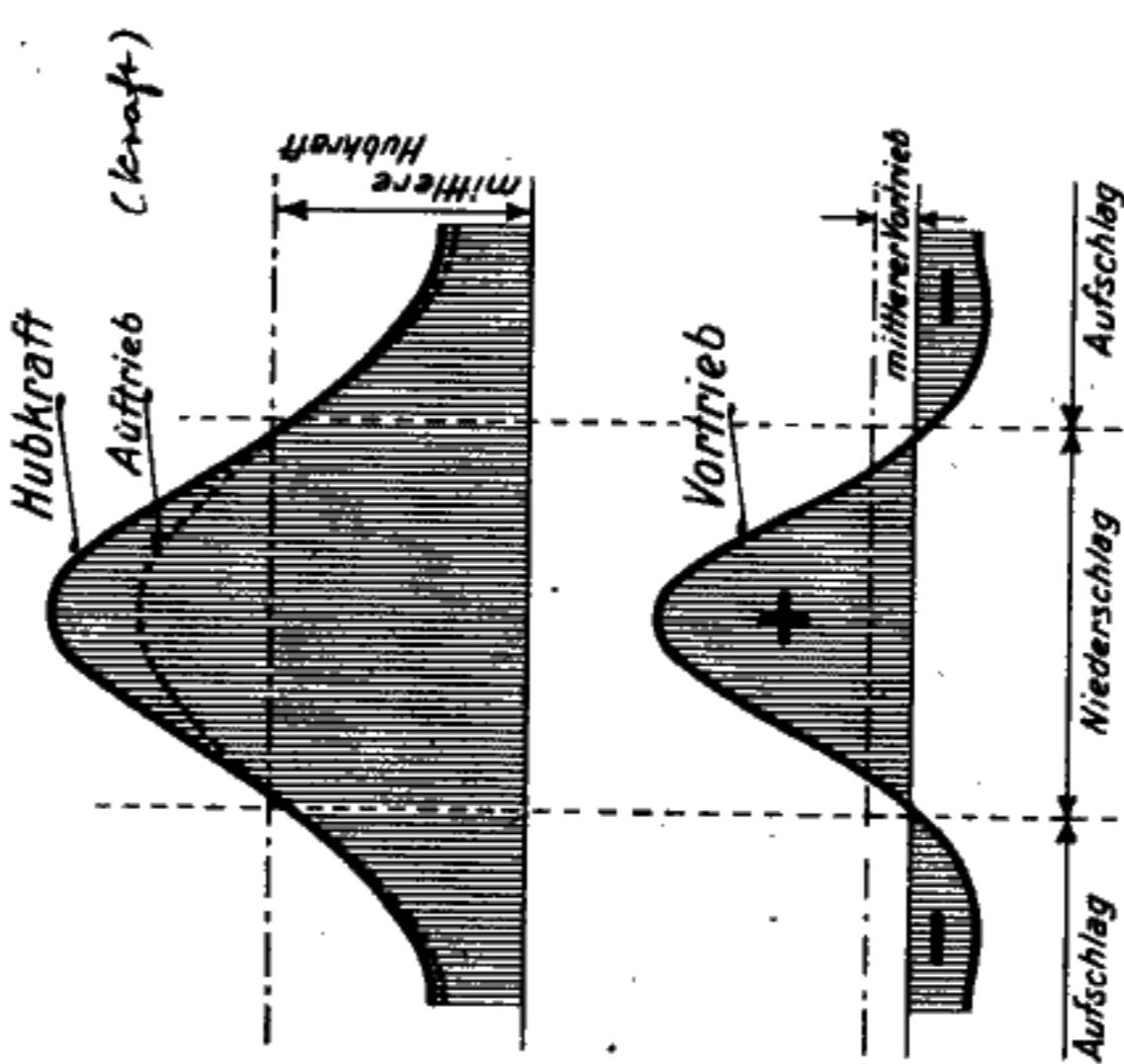


Abb. 16: Schlagflügeldiagramm einer Schwinge bei mittlerem Zuströme.
oben: Hub- und Zuströmeberlauf.
unten: Zuströmeberlauf während einer vollen Schwingung.
Man erhält also im Falle der auftriebssbelasteten Schwinge eine wesentlich schlechtere Ausnutzung der Motorleistung. Weiterhin ist man gezwungen, einen stärkeren Motor zu benötigen, damit die große Niederflügelarbeit von dem Motor aufgebracht wird. Diese ungünstigen Verhältnisse bei der auftriebssbelasteten Schwinge kann man dadurch verbessern, daß man den Flügel durch eine aufschläge Gedierung so aufhängt, daß der mittlere Zuströme durch die Feder- spannung ausgeglichen wird. Dann wird die Feder beim Aufschlag gespannt und gibt ihre Energie beim Niederflügel als aufschläge

Leistung ab, so daß die Belastung des Motors im Auf- und Tieber-Schlag wiederum gleichförmig wird. Mechanisch bringt dies allerdings einige Schwierigkeiten; jedoch kann man sich mit dieser Methode in all den Fällen helfen, in denen es einem nicht gelungen ist, die Schwingen so einzustellen, daß sie von der Null-Lage aus angestrieben werden.

Wir wollen nun noch einmal kurz überlegen, was eintritt, wenn wir die Schwinge stets so zur Bahneigung einstellen, daß während des Auf- und Niederschlags kein Auftriebswechsel stattfinde. Wir nehmen an, daß die Schwinge stets einen bestimmten positiven Auftrieb liefert und bestimmen aus der Kräftezerlegung beim Auf- und Niederschlag unter gleichen Winkel den sich als Mittelwert beibehaltenden ergebenen Diortrieb (Abb. 17). Beim Aufschlag erhalten

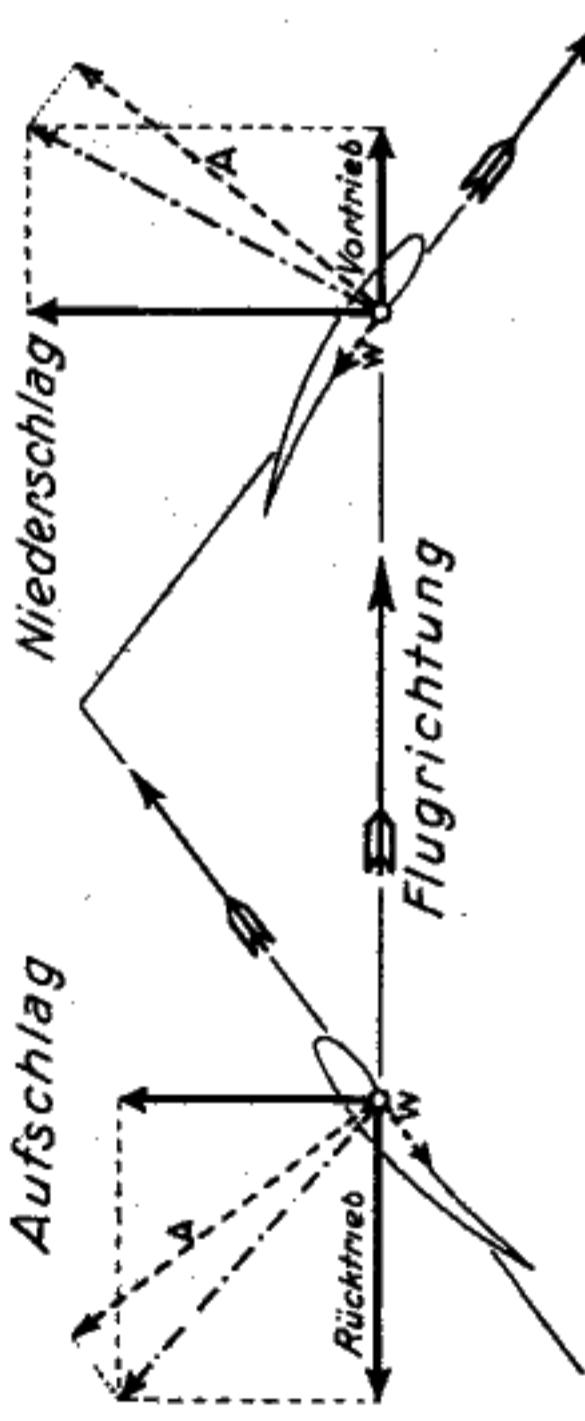


Abb. 17: Vergleich der Kraftwirkung beim Auf- und Niederschlag eines Schlagflügels bei gleichbleibendem Auftrieb.

wir infolge der Rückwärtsneigung der Gesamtluftkraft einen Rücktrieb, während wir beim Niederschlag Vortrieb erzeugen. Bei der Betrachtung der Zerfällung erkennst man sofort, daß der Rücktrieb größer ist als der Vortrieb, weil die Widerstandskomponente im Falle des Aufschlages sich zum Rücktrieb addiert, während beim Niederschlag die Vortriebkomponente um den Widerstand vermindert wird. Das Mittelwert von Aufschlag und Niederschlag heißt also der Widerstand übrig, der zu dem betreffenden Auftrieb gehört.

Wir kommen demnach zu dem wesentlichen Schluß, daß die Erzeugung eines kräftigen Vortriebs gebunden ist an einen Auftriebswechsel zwischen Auf- und Niederschlag, und zwar muß der Aufschlag beim Niederschlag stets kleiner sein als der Aufschlag beim Niederschlag. Da ein Profil nur einen bestimmten Auftriebsbereich überdeckt, muß man zur Erzeugung eines kräftigen Vortriebs solche Profile verwenden, die einen möglichst großen Auftriebsbereich liefern. Im Idealfaile müßte man deshalb ein Profil haben, das beim Aufschlag große positive Auftriebe und beim Niederschlag große positive Auftriebe liefert. Das bedeutet die Verwendung eines in der Zusammensetzung symmetrischen Bogelflügels.

Bogelflügel. Der Bogelflügel besitzt derartige Eigenschaften, und es ist mit ein Grund für die elastische Ausbildung des Bogellügels, eine wenn auch begrenzte Verstellbarkeit zu erreichen. Der dauernd wechselnde Auftrieb bedingt eine weitere physikalische Erscheinung, nämlich das durch den Auftriebswechsel herborgerufene Zittern von sogenannten Aufnahmwirbeln. Im Zuggenbild, in dem sich ein Flügel aus der Null-Lage ohne Auftrieb so bewegt, daß eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Aufstellwinkels eintritt, tritt eine Zitterbewegung der Strömungsform ein, die nach einer gewissen Zeit in die zu diesem Aufstellwinkel gehörige stationäre Umströmung übergeht. In diesem Übergangsstadium muß die den Auftrieb erzeugende Zirkulation um den Flügel „angefahren“ werden. Die Zirkulation um den Flügel kann natürlich nur dann entstehen, wenn eine gleich große, aber entgegengesetzte gerichtete Zirkulation als freier Wirbel durch die anfangs eintretende Umströmung der Hinterkante des Profils erzeugt wird. Im Zuggenbild der Zunahme Richtungsänderung umströmt die Luft den Flügel auerst so, daß ein

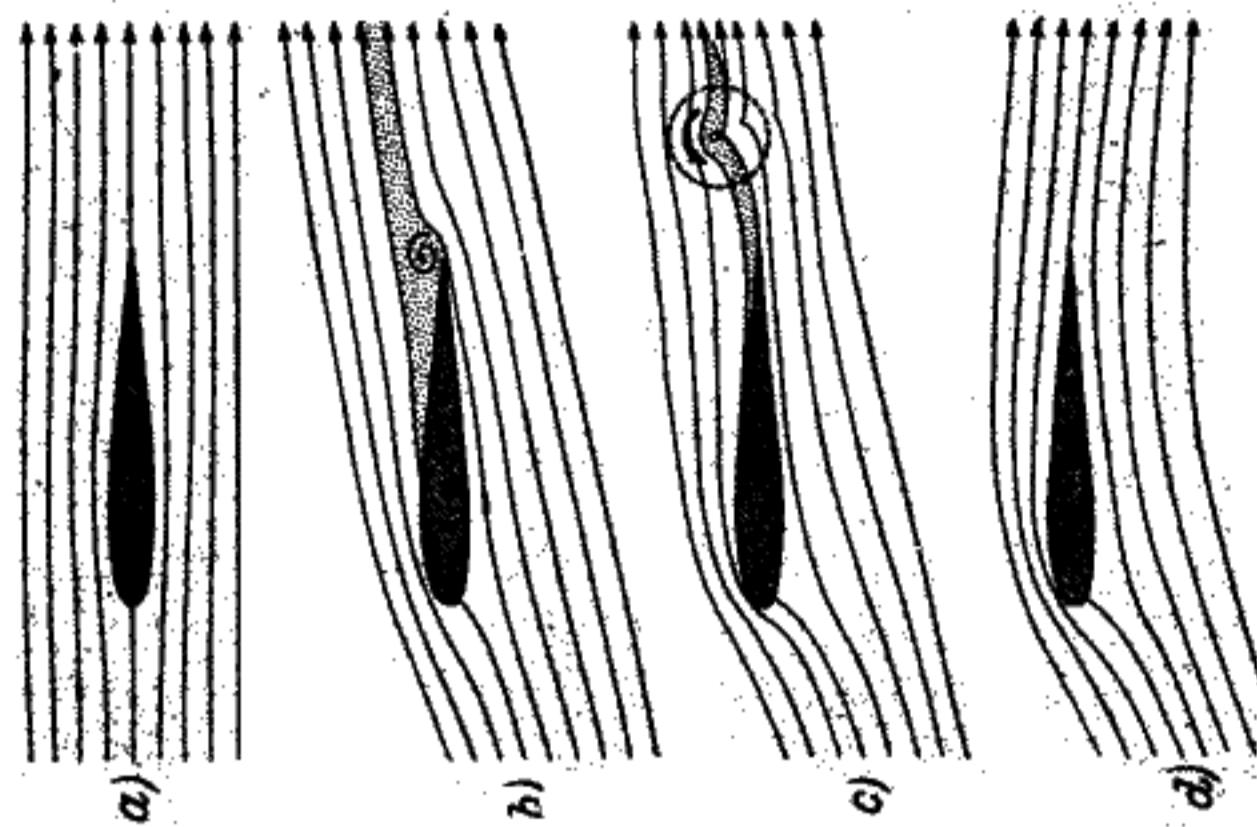


Abb. 18: Die Entstehung des Aufnahmwirbels.
a) Umströmung ohne Auftrieb.
b) Zustand kurz nach der Änderung des Aufstellwinkels.
c) Der Aufnahmwirbel löst sich von der Hinterkante ab.
d) Voll entwickelte stationäre Umströmung.

Auftrieb entsteht (Abb. 18). Der wesentliche Unterschied gegenüber der Auftriebsströmung ist hierbei der, daß die Strömung nicht an der Hinterkante glatt abfließt, sondern ein Umströmen der Hinterkante eintritt. Dieser Zustand ist jedoch nur vorübergehend möglich, da sehr schnell eine Auflösung der Strömung an der Hinterkante einsetzt, welche die Entstehung eines Wirbels über der Hinterkante zur Folge hat. Dieser Wirbel hat entgegengesetzten Drehzinn zu der auftriebserzeugenden Strömulation, die bekanntlich auf der Saugseite des Flügels in Strömungsrichtung und auf der Druckseite entgegen der Strömungsrichtung dreht.

Der über der Hinterkante entstehende Wirbel wird schnell größer und kommt mit den über dem Profil nach hinten bewegten Luftmengen in Berührung, so daß er nach hinten weggespült wird. Damit schließen sich die Stromlinien an der Hinterkante beim Profil vollständig an, d. h. die zur Auftriebszeugung notwendige Strömulation ist voll ausgebildet. Der von der Hinterkante erzeugte und nach hinten abwandernde Wirbel wird der Auftriebwirbel genannt. Die Zeitspanne, in der dieser ganze Vorgang stattfindet, bestimmt, ob der Auftrieb erstmals Zeit nach dem Eintritt der neuen Bewegungsrichtung einsetzt. Wird nun andererseits wie beim Schlagflügel eine periodische Ziemdeung des Auftriebs zur Herstellung eines entsprechenden Auftriebs notwendig, so muß ein dauerndes Entstehen von Auftriebwirbeln stattfinden. Der Flügel wird sich also niemals in einem stationären Strömungszustand befinden, sondern immer in einem Übergangszustand, und es werden sich dauernd an der Hinterkante Auftriebwirbel abscheiden. Damit nun die Auftriebsänderung möglichst schnell vor sich geht, muß die Erzeugung der notwendigen Auftriebwirbel ebenfalls, wenn möglich, beschleunigt werden. Bei einem starren Flügel muß die Auftriebsströmung die Erzeugung herabtragen. Vermindert man jedoch einen Flügel mit einer elastischen Hinterkante, so wird durch das mechanisch bedingte Schwingen der Hinterkante das Entstehen der Auftriebwirbel nicht der Luftströmung überlassen, sondern die Energie wird aus dem Antrieb der Schwinge übernommen. Allerdings muß die Verformung der Hinterkante mit dem zeitlichen Verlauf der Auftriebwirkungsänderung so gekoppelt sein, daß die Wirkung auch zu dem richtigen Zeitpunkt und in dem richtigen Maße verbleiben. Es ist nämlich durchaus möglich, daß die Hinterkante infolge Massenverteilung und Elastizität eine Schwingung ausführt, die wohl Auftriebwirbel erzeugt, aber im Anstellwinkelbereich, so daß die Auftriebsvergrößerung bei Auftriebwirkungsänderung überhaupt nicht oder sogar in verkehrtem Sinne erfolgt. Ueber diesen Zusammenhang zwischen der Bewegung der Hinterkante und der Auftriebwirkung der Auftriebwirkung müssen noch eingehende Untersuchungen durchgeführt werden, um die günstigste Bewegung vorauszusagen zu können. Sobald können wir jedoch schon feststellen, daß die Hinterkante bei nachsendem Auftrieb

von oben nach unten schlagen muß, während bei Auftriebsvermindezung eine umgekehrte Bewegung richtig ist. Dementsprechend muß sich die Hinterkante in der oberen Lotpunktage nach oben durchbiegen und beim Einsetzen des Niederschlags nach unten schlagen, während in dem unteren Lotpunkt die Hinterkante nach unten durchgebogen sein muß, damit sie beim Einsetzen des Aufschlages nach oben schlägt. Der Leser wird vielleicht fragen, warum ich auf diese physikalischen Erfcheinungen so eingehend hingewiesen habe, denn sie sind gewiß für benigenen, der aerodynamisch nicht geschult ist, schwer verständlich und werden leicht als eine Theorie gewertet, die nur für den Fachmann von Wichtigkeit ist. Diese Ansicht ist falsch, denn jeher, der sich mit dem Schwingenflug beschäftigt, kann nur dann auf diesem Gebiet etwas erreichen, wenn er sich über das Zustandekommen der Auftriebswirkung eines Schlagflügels im Klaren ist. Ich behaupte aber, daß das Problem der Erzeugung der Auftriebwirkung das eigentliche Problem des Schlagflügels ist. Ich kann nicht behaupten, daß nur deshalb so viele Versuche völlig scheitern mußten, weil keiner diese physikalischen Grundlagen berücksichtigt und die Konstruktion danach einrichtet. Die Kenntnis dieser Vorgänge ist andererseits notwendig, um auftretende Mängel in den Flugleistungen richtig deuten zu können. So sind z. B. Schwingenflugmodelle meist sehr schwer in den Geraubeaufzug zu bringen, und man kann trotz scharfster Prüfung oft nicht feststellen, wo der Fehler steckt. Weiß man aber, daß die Verformung der Hinterkante den Vortrieb einschließlich beeinflußt, so wird man sofort verstehen, daß kleine Herstellungsgenauigkeiten der Bespannung Unterschiede in der Vortriebswirkung herborufen können, weil eben anders gearbeitete Auftriebwirbel von beiden Flügeln ausgehen.

Wer sich diese Erfcheinungen anschaulich darstellen will, dem kann ich nur raten, Versuche mit schwingend bewegten Profillen im Wasserkanal anzustellen. Man kann hier die Bildung der Auftriebwirkung sehr gut beobachten und auch die Wirkung der elastischen Hinterkante studieren. Auch Rauchversuche am Schlagflügel des Modells lassen die Strömungsergebnisse erkennen.

Wie bereits ange deutet, steht in der hinter dem Flügel entstehenden Wirkelstrasse ein Teil der zum Antrieb des Flügels aufgewandten Energie, und man muß bei der Betrachtung des Wirkungsgrades des Flügels diese Energie als Verlust in Rechnung legen. Es ist leicht einzusehen, daß der Energieverlust, der durch die Erzeugung der Auftriebwirkung entsteht, mit größer werdendem Aufschlag zwischen Auf- und Niederschlag anwächst. Der Energieverlust wird Null werden, wenn kein Auftriebwirkung eintritt. Wir haben aber weiter oben festgestellt, daß dann auch kein Antrieb entsteht.

Denn wir uns also den Auftriebswechsel stufenweise erhöht, so wird folgendes eintreten:

Der Flügel steigert sich und wird immer größer, je steiler der Verlauf der Bahnturbe ist.

Die Verluste in der Wirbelstraße wachsen dadurch immer mehr an, was einem Abfallen des Wirkungsgrades entspricht.

Beide Wirkungen überzeugen sich, und es muß für eine bestimmte Bahnturbe oder einen entsprechenden Auftriebswinkel einen günstigen Ausgleich zwischen besserem Flügelbetriebserzeugung und geringstem Energieverlust in der Wirbelstraße geben. Letzter sind wir heute noch nicht in der Lage, diese beste Bewegung genau feststellen zu können. Solange also Messungsergebnisse hierüber nicht vorliegen, müssen wir auf Grund von Naturbeobachtungen und praktischen Flugergebnissen an Modellen versuchen, die günstigsten Verhältnisse wenigstens näherungsweise festzulegen.

Dabei müssen wir in erster Linie für verschiedene bedienartige Flügelgestaltung einen Vergleichsmäßstab aufstellen, der es gestattet, unabhängig von der Dimension, d. h. unabhängig von Geschwindigkeit, Frequenz, Spannweite und Aufschlagwinkel, die Beobachtungsergebnisse miteinander zu vergleichen. Wir müssen hier nämlich zu einem ähnlichen Begriff für die Schwinge kommen, wie wir ihn bei den Luftschraubenuntersuchungen als Flügelflitzgrad kennen. Dazu

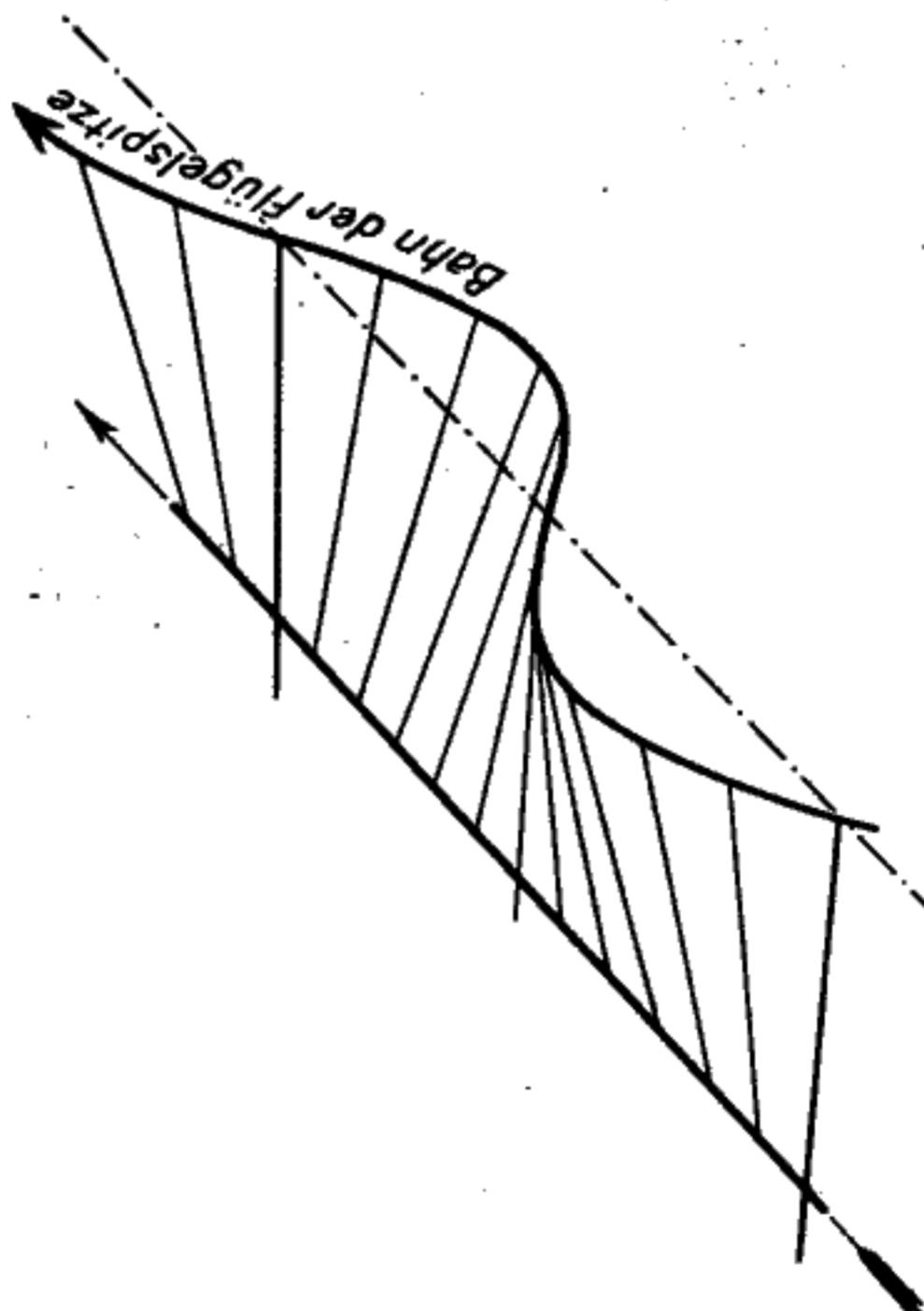


Abb. 19: Die Bahnturbe eines Flügels.

müssen wir bedenken, daß die Schwinge nicht als Sanges parallel auf- und abbewegt wird, sondern daß die in der Oberfläche im wesentlichen starre Schwinge um eine im Flugrichtung liegende Achse

auf- und abpendelt. Die Flügelteile in der Nähe dieser Achse beschreiben also einen fürzeren Aufschlagweg, während der Weg des Außenflügels am längsten ist. Da aber die ganze Schwinge sich mit gleicher Geschwindigkeit fortbewegt, werden demnach die inneren Flügelteile flache Bahnturben durchlaufen, und an der Flügelspitze wird die Steilheit der Bahnturbe einen Größtwert annehmen. Die Schwinge durchläuft also während ihrer Fortbewegung eine wellenförmige Fläche, die auf einer Seite durch eine Linie, nämlich die Bahnturbe der Schwingendrehachse, gebildet wird, während die Begrenzung auf der anderen Seite der steilen Wellenbahn der Flügelspitze entspricht.

Wir können nun sagen, daß zwei Schwingen verschiedenster Dimension dann unter gleichen Betriebsverhältnissen arbeiten, wenn sie einander ähnliche Bahnturben durchlaufen. Diese Flächen sind dann einander ähnlich, wenn sie lediglich durch maßstäbliche Vergrößerung der einen Fläche zur Deckung gebracht werden können. Nun ist es selbstverständlich möglich, durch verschiedenartige Bewegungen der Schwinge, beispielsweise durch freiesende Bewegung, eine Zielzahl von Bahnturben zu erreichen, so daß die Beurteilung gleichartiger Betriebsverhältnisse sehr umfangreiche Untersuchungen voraussetzt. Dies wird man bei einer späteren Entwicklung auch berücksichtigen müssen. Für den Anfang ist es jedoch zweifellos richtiger, begriffliche Vereinfachungen einzuführen, die es ermöglichen, aus der Kenntnis einiger eindeutiger Abmessungen und Geschwindigkeiten einen Vergleichsmäßstab für verschiedeneartige Betriebsverhältnisse zu gewinnen.

Wir sehen daher daraus, daß wir es im wesentlichen mit vertikaler aufwärts und abwärts bewegten Schwingen zu tun haben und daß diese Aufwärts- und Abwärtsbewegung eine harmonische Bewegung ist. Wir können dann als Maß für einen bestimmten Betriebszustand die größte Neigung der Bahnturbe an der Flügelspitze festlegen, die der Definition des Flügelflitzgrades als Steigungswinkel an der Spitze des Luftschraubenblattes entspricht. Diese Neigung ist gekennzeichnet durch das Verhältnis der Flügelflitzgrade zur vertikalen Schlaggeschwindigkeit beim Durchgang durch die Mittellage.

Die Flügelflitzgrade bezeichnen wir mit v . Führt die Schwinge je Schübe n_s solle Schwingungen aus, wobei sie um den Winkel γ ausschlägt, so ist die größte Schlaggeschwindigkeit für eine Schwinge mit der Länge R (von der Spitze bis Flügelspitze) gegeben durch:

$$u = \pi \cdot n_s \cdot R \cdot \gamma (\gamma \text{ in Bogenmaß})$$

Bezeichnen wir ferner den gesuchten Flügelflitzgrad der Bahnturbe mit λ_s und bedenken wir, daß $\lambda_s = \frac{v}{u}$ ist, so erhalten wir (Abb. 20):

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{v}{n_s \cdot R \cdot \gamma}$$

Diesen Ausdruck können wir in gleicher Weise wie bei der Luftschraube als Fortschrittsgrad der Schwinge festlegen und sagen, daß zwei verschiedenen großen Schwingen dann unter gleichen Betriebsverhältnissen mit dem gleichen Fortschrittsgrad arbeiten, wenn der Flügelspitze im Sinne einer stetigen Verfeinerung, da der Fortschrittsgrad durch das Verhältnis Fluggeschwindigkeit zu Schlaggeschwindigkeit gegeben ist und die Schlaggeschwindigkeit nach der Flügelspitze hin mit der Entfernung von der Drehachse zunimmt.

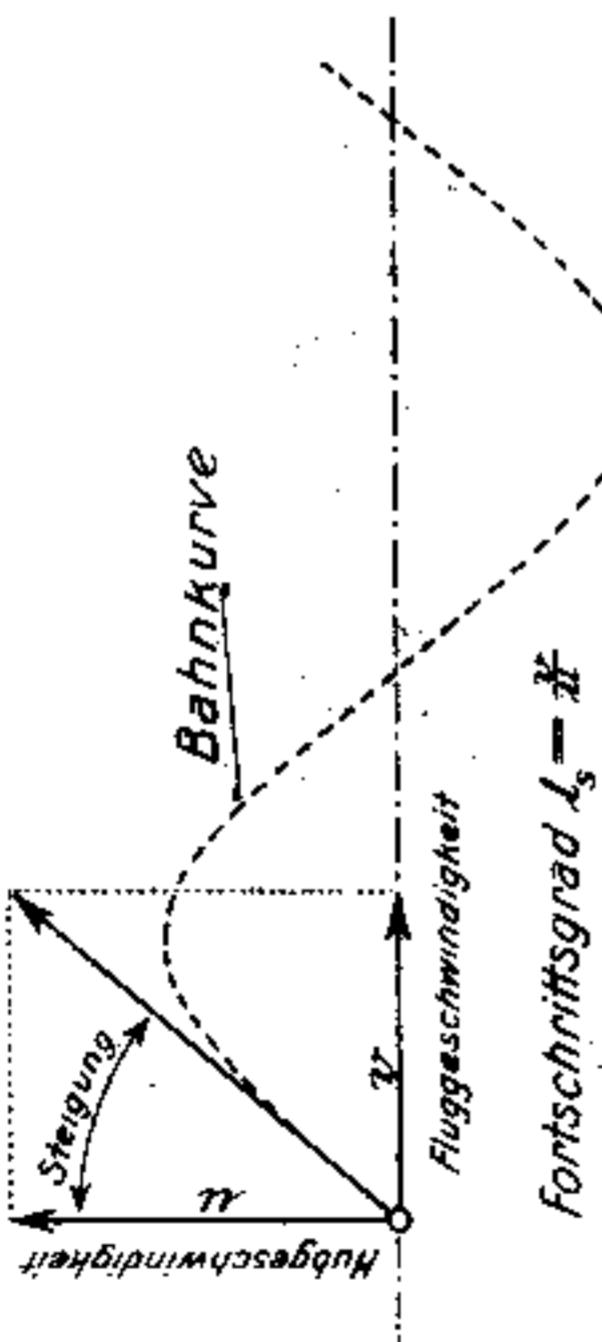


Abb. 20: Bestimmung des Fortschrittsgrades eines Schlagflügels.
arbeiten, wenn sie gleiche Schwingenfortschrittsgrade aufweisen. Wir können auf diese Weise Versuchsergebnisse an Modellen und Beobachtungsergebnisse des Starrflugs miteinander vergleichen, um experimentell Zutrefflichkeit zu erhalten über den Bereich der Schwingenfortschrittsgrade, der die günstigsten Betriebsverhältnisse im Hinblick auf guten Wirkungsgrad liefert.

Wenn wir von der einfachen Profiltheorie ausgehen, bei der wir festgestellt haben, daß die günstigsten Wirkungsgrade bei mittleren Bahnneigungen von etwa 45° auftreten, so können wir hieraus näherungsweise die unter diesem Gesichtspunkt günstigsten Betriebsverhältnisse der Schwingen ableiten. Gehen wir nämlich ähnlich wie bei der Luftschraubenberechnung davon aus, daß die Wirkung der ganzen Schwinge durch die Eigenschaften eines Flügelprofils, der die mittlere Bewegung des kleinen Flügelkopfes und Flügelzurzel ausführt, gekennzeichnet ist, und legen wir diesen Flügelkopf wie bei der Luftschraube in 70% der Flügelspannweite (R), dann können wir in erster Näherung sagen, daß wir den Bereich günstiger Wirkungsgrade bei Betriebsverzerrung erreichen werden, wenn sich dieser Flügelchnitt in $0,7 R$ mit der mittleren Bahnneigung von 45° bewegt. Diese mittlere Bahnneigung entsprach einem λ_s von $0,637 = \left(\frac{2}{\pi}\right)$.

Nun wollen wir aber der Einfachheit halber den Fortschrittsgrad der Schwinge auf die Flügelspitze beziehen und denmaß den für $0,7 R$ gültigen Wert durch Multiplikation mit $0,7$ auf die Flügelspitze umrechnen. Somit muß also das λ_s der Flügelspitze sein:

$$\frac{0,7 \cdot 2}{\pi} \approx 0,445$$

Der Fortschrittsgrad ändert sich ja von der Drehachse zur Flügelspitze im Sinne einer stetigen Verfeinerung, da der Fortschrittsgrad durch das Verhältnis Fluggeschwindigkeit zu Schlaggeschwindigkeit gegeben ist und die Schlaggeschwindigkeit nach der Flügelspitze hin mit der Entfernung von der Drehachse zunimmt.

Wir können also als Zuschluß dieser Betrachtung sagen, daß eine Schwinge dann mit einem guten Wirkungsgrad arbeitet, wenn der Fortschrittsgrad für die Flügelspitze bei $0,445$ liegt. D. h. es müßte sein:

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{v}{n_s \cdot R \cdot \gamma} \approx 0,445$$

Wenn wir also beispielweise ein Modell herstellen, so können wir anhand der Formel leicht ausrechnen, mit welcher Schlagzahl die Schwingen betrieben werden müssen, damit wir einen günstigen Wirkungsgrad erreichen.

Dies sei am einem Beispiel erläutert, und zwar denken wir uns ein Modell mit einer normalen Geschwindigkeit von 8 m/sec , einer Schwingspannweite von $R = 0,3 \text{ m}$ und einem Zuschlagwinkel von $\gamma = 80^\circ$. Es ist festzustellen, mit welcher Schlagzahl die Schwingen unter günstigen Betriebsverhältnissen arbeiten werden. Dann ist:

$$\lambda_s \text{ günst.} = 0,445 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{v}{n_s \cdot R \cdot \gamma}$$

D. h.:

$$\frac{v}{n_s \cdot R \cdot \gamma} = 1,4$$

Gehen wir nun:

$$v = 8 \text{ m/sec}$$

$$\frac{v}{R \cdot 0,3 \cdot \pi} = 1,4 \text{ (Bogenmaß)}$$

$v = 80^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = 13,6 \text{ /sec}$

Zuf die Schlagzahl je Minute umgerechnet, müssen wir die Schwingungen je Minute schlagen lassen.

Diese Schlagzahl stellt den günstigsten Grenzwert dar, d. h. über diese Schlagzahl noch hinaus zu gehen, ist bestimmt unwirtschaftlich; man wird in den meisten Fällen, durch mechanische Schwierigkeiten bedingt, die Schlagzahl nicht voll erreichen, denn die Massenträgheit der Flügelspitze ist groß.

Schwinge und die Luftdämpfung machen es schwierig, höhere Schlagzahlen zu erreichen. Wir haben ja auch andererseits die Verluste infolge Bildung der Zinfahrtröhre unberücksichtigt gelassen, so daß wir wohl annehmen können, daß der günstigste Gesamtzitzungsgrad etwas unterhalb der aus der reinen Profilbetrachtung errechneten Schlagzahl liegt.

Demnach können wir erwarten, daß λ_s günst. größer sein wird als 0,445. Nach eigenen Versuchsergebnissen, die allerdings noch wesentlich erweitert werden müssen, lag λ_s günst. etwa bei 0,6. Es ist bemerkenswert, daß Messungsergebnisse am Lufthöhenrauben den besten Fortschrittsgrad ebenfalls in der Gegend von $\lambda = 0,6$ liefern. Insgesamt können wir aus der Betrachtung zusammenfassend folgendes ableiten:

Für die Betriebszeugung mit Schwingen gibt es in ähnlicher Weise wie bei den Lufthöhenrauben einen Bereich günstiger Zitzungsgrade, der durch eine bestimmte Steilheit der Bahnlurpe oder durch einen bestimmten Schwingenfortschrittsgrad gekennzeichnet ist. Daraus ergeben sich folgende Richtlinien für die Herstellung günstiger Betriebsverhältnisse einer Schwinge: Je größer die Schwingenlänge ist, umso niedriger darf die Schlagzahl sein. Je größer auch der Zusatzschwung ist, umso kleiner darf die Schwingenlänge und die Schlagzahl sein. Eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeit bedingt eine gleichzeitige Vergrößerung der Schlagzahl, wenn Fluggeschwindigkeit und Zusatzschwung erhalten bleiben.

Diese Gesetzmäßigkeiten muß man unbedingt im Auge behalten, wenn man sich ernsthaft mit dem Bau von Schwingenflugmodellen befassen will. Schön bei der Erfahrungserhebung der an sich viel einfacheren Lufthöhenrauben werden oft beträchtliche Fehler gemacht. Umso mehr muß bei der Durchführung von Schwingenflugversuchen jederlich damit beschäftigt werden, die notwendigen Grundlagen so weit beherrschten, daß die Herstellung von Schwingenflugmodellen nicht Bastelerei, sondern Mitharbeit am einem Problem wird, zu dessen Lösung jeder ernsthaft arbeitende beitragen kann.