Schwingenflugmodell des NSFK

von Alexander Lippisch

Berlin 1938

Vom Abschnitt “1. Gedanken, zur Entwicklung des Schwingenfluges” ist hier nur eine handschriftliche Abschrift vorhanden (schlecht leserlich).

3. Die aerodynamischen Grundlagen des Schwingenfluges.

Von Alexander Lippisch.

Die Schlagbewegung des Vogelflügels liefert, wie die Beobachtung zeigt, eine Vortriebskraft, die in gleicher Weise wie der Luftschraubenschub den im Fluge entstehenden Stirnwiderstand überwindet und dadurch die zum Fliegen notwendige Fluggeschwindigkeit dauernd aufrecht erhält. Wir wissen, daß der Vortrieb einer Luftschraube dadurch entsteht, daß die Blätter eine etwa senkrecht zu ihrer Ebene stehende Luftkraft erzeugen, so daß die in Flugrichtung wirkende Komponente dieser Luftkraft einen Schub und die in Drehrichtung wirkende Komponente einen Drehwiderstand erzeugt (Abb. 11). Unter gleichbleibenden Betriebsverhältnissen sind diese Kräfte an der Luftschraube 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 Luftschraube wie beim Tragflügel „stationäre Strömungsverhältnisse".

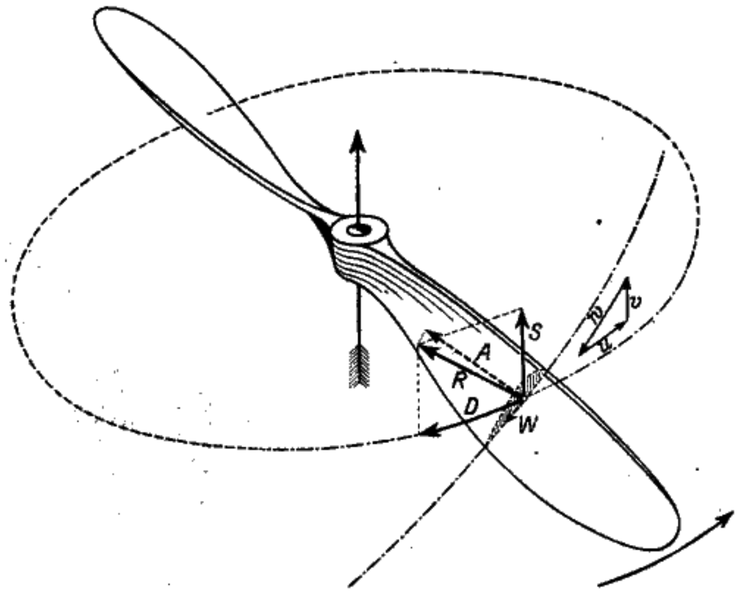


Abb. 11: Die Entstehung der Vortriebskräfte an der Luftschraube.

Beim Schlagflügel liegen die Verhältnisse insofern völlig anders, als hier durch die Auf- und Abbewegung bei gleichzeitigem Vorwärtsflug ein dauernder periodischer Wechsel der Anströmungsrichtung vor sich geht. Denken wir uns also die Bewegung, die ein Flügelschnitt ausführt, in einer Ebene dargestellt, die in Flugrichtung liegt und parallel zur Symmetrieebene des Flugzeugs ist, so erhalten wir

als Bahnkurve dieses betreffenden Flügelschnittes eine Wellenlinie. Führt der Schlagflügel lediglich eine reine Auf- und Abbewegung aus, so hat diese Wellenlinie die Gestalt der bekannten Sinuskurve. Wird der Flügel dagegen kreisend auf und ab bewegt, so erhalten wir eine Zykloidenkurve. Dazwischen liegende Bewegungsarten liefern Bahnkurven, die beispielsweise einen flacheren Niederschlag und einen steilen Aufschlag ergeben.

Um das Zustandekommen des Vortriebs eines Schlagflügels in seinen Grundzügen zu erklären, wollen wir den einfachsten Fall der Flügelbewegung durch reines Auf- und Abschlagen in harmonischer Folge betrachten, so daß wir die von dem betreffenden Profil durchlaufene Bahn als eine reine Sinuskurve annehmen können.

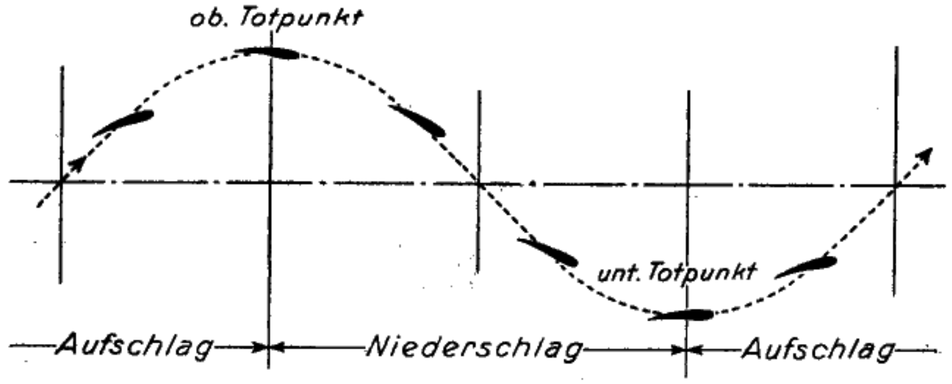


Abb. 12: Die Bahnkurve eines Schlagflügels.

In Abb. 12 ist ein Teil dieser Bahnkurve dargestellt, so daß wir den Weg während eines vollen Auf- und Niederschlages verfolgen können. Von der Stellung des Flügels in der Mittellage bewegt sich die Schwinge aufwärts bis zum oberen Totpunkt, kehrt dann die Bewegungsrichtung um und läuft über die Mittellage zum unteren Totpunkt, wo sich die Bewegungsrichtung wiederum ändert, so daß der Flügel in die Anfangslage zurückkehrt. Der erste Teil der Bahnkurve bis zum oberen Totpunkt gehört zum Aufschlag, dann folgt vom oberen bis zum unteren Totpunkt der Niederschlag, und das letzte Stück der Bahnkurve ist wiederum der Beginn des Aufschlages.

Wir wollen bei unserer Betrachtung davon ausgehen, daß der betreffende Flügelschnitt in der Mittellage bzw. in der Ausgangsstellung keinen Auftrieb erzeugt. Der Flügelschnitt würde also beispielsweise zu einem Schlagflügel gehören, wie er sich an meinen Modellen befindet und dessen Einstellung so vorgenommen ist, daß der Schlagflügel selbst keinen Auftrieb mehr erzeugt. Bewegt sich das Profil jetzt aus der Anfangslage nach oben, so wird es von der Luft in Richtung der durchlaufenen Bahnkurve 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.

Im oberen Totpunkt ist die Anblasrichtung die Flugrichtung, d. h. der Anstellwinkel wird Null, und auf dem nun beginnenden Niederschlagsweg erhalten wir einen bis zur Mittelstellung anwachsenden und dann wieder abklingenden positiven Anstellwinkel. Auf diesem Teil des Weges muß das Profil also auch positiven Auftrieb liefern. Im unteren Totpunkt wird der Anstellwinkel wiederum Null, und es beginnt der Aufschlag, bei dem der Anstellwinkel in negativer Richtung bis zur Mittellage anwächst und dann wieder bis zum oberen Totpunkte abklingt.

Dieser periodische Wechsel des Anstellwinkels beim Schlagflügel muß eine periodische Aenderung des Auftriebes zur Folge haben. Wir wollen nun überlegen, in welcher Weise sich diese wechselnden Auftriebskräfte als Vortrieb auswirken können.

Das schräg von oben angeblasene Profil (Abb. 13) erzeugt eine negative Auftriebskraft, die auf der Anströmungsrichtung senkrecht stehen muß. Gleichzeitig tritt ein dem Auftrieb entsprechender Widerstand ein.

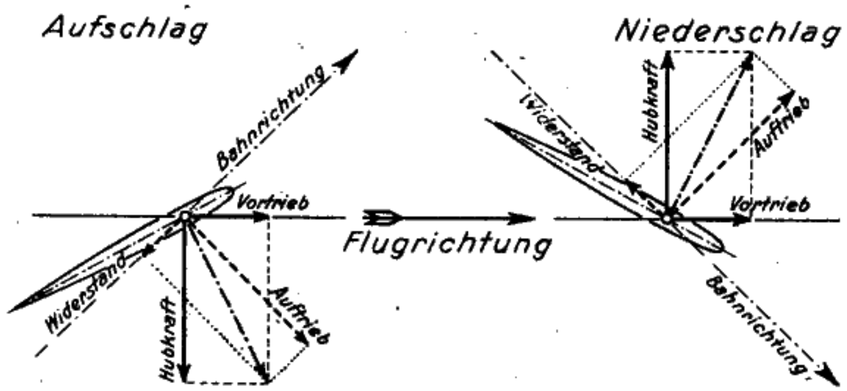


Abb. 13: Die Kräfte an einem Schlagflügelprofil beim Aufschlag. Abb. 14: Die Kräfte an einem Schlagflügelprofil beim Niederschlag.

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 Achse unserer Bahnkurve. Die Komponente in dieser Richtung liefert also einen Vorwärtszug, während die dazu senkrechte Komponente eine die Schlagbewegung hemmende Luftkraft darstellt. Die vorwärtsziehende Komponente wollen wir als Vortrieb bezeichnen, die dazu senkrechte Komponente als Hubkraft. Ich wähle diese Bezeichnungen absichtlich, um dadurch klar zu unterscheiden gegenüber Auftrieb und Widerstand, weil diese beiden Komponenten der gesamten Luftkraft stets auf die Anblasrich-

tung bezogen werden müssen. Infolge der schrägen Anblasrichtung liefern dann diese Kräfte, auf die Bewegung des ganzen Flugzeugs bezogen, die Vortriebs- und Hubkraft.

Bei Annäherung an den oberen Totpunkt verringert 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 nunmehr mit positivem Anstellwinkel vor sich, und wir erhalten demnach eine Umkehr der Kräfte gegenüber der Aufschlagstellung (Abb. 14). Der schräg von unten angeblasene Flügel erfährt senkrecht zur Bewegungsrichtung einen Auftrieb und in der Bewegungsrichtung einen Widerstand, die zu einer Gesamtluftkraft zusammengesetzt 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.

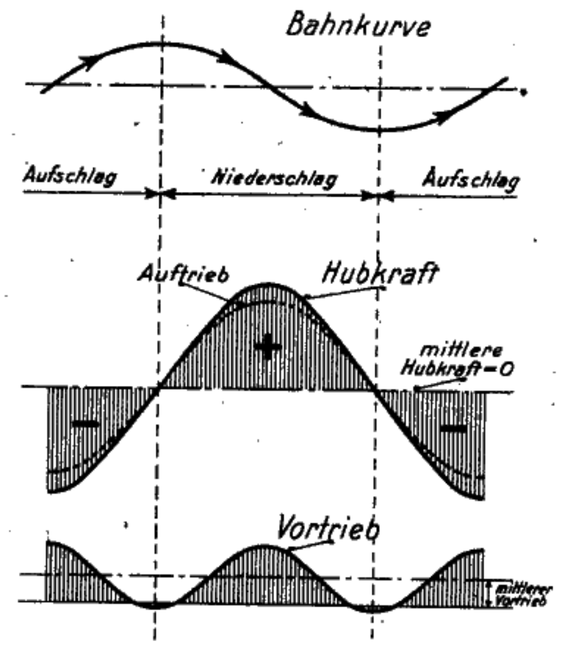


Abb. 15: Schlagflügeldiagramm einer Schwinge ohne mittleren Auftrieb.
oben: Die der Bestimmung der Kräfte zugrunde gelegte Bahnkurve,
Mitte: Verlauf des Auftriebs und der Hubkraft während einer vollen Schwingung,
unten: Verlauf der Vortriebswirkung der Schwinge.

Betrachten wir also den Verlauf der periodisch wechselnden Luftkräfte während eines ganzen Flügelschlages, so können wir diesen Verlauf in Form der Abb. 15 darstellen. Wir tragen also längs des

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

Bestimmen wir nun den Flächeninhalt der von den Kurven und der Abszissenachse eingeschlossenen Fläche und berechnen daraus die mittlere Höhe, so erhalten wir die während dieser Flügelschlagbewegung erzeugten mittleren Kräfte. Diese Mittelwerte sind ebenfalls in der Abbildung eingetragen.

Der Wirkungsgrad, mit dem der Vortrieb erzeugt wird, ist gegeben durch das Verhältnis von Vortrieb mal Fluggeschwindigkeit zu Hubkraft mal Schlaggeschwindigkeit. Unter Schlaggeschwindigkeit verstehen wir hier die vom Antrieb erzeugte Vertikalgeschwindigkeit der Schwinge, denn die vom Antrieb ausgeübte Kraft ist der Hubkraft entgegengesetzt und die gegen die Hubkraft geleistete Arbeit stellt die Antriebsarbeit dar.

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

Betrachtet man die Betriebsverhältnisse einer Schwinge, die in der Null-Lage auftriebsbelastet ist, so erhält man in dem Schlagflügel-Schaubild einen Auftriebsverlauf, der um einen entsprechenden positiven Mittelwert schwankt. Dadurch wird auch der Mittelwert der Hubkraft positiv, so daß die vom Antrieb zu überwindende Hubkraft beim Niederschlag größer und beim Aufschlag kleiner ist als beim Betrieb der Schwinge ohne mittleren Auftrieb. Die beim Niederschlag aufzubringende augenblickliche Leistung fordert also ein größeres Motordrehmoment, während beim Aufschlag die Schwinge schon durch die Luftkraft in die obere Totpunktlage gehoben wird, zumindest 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 Niederschlagsarbeit zu überwinden imstande ist. Im Aufschlag läuft er dann praktisch leer, denn seine Leistung kann nicht in Vortrieb umgewandelt werden (Abb. 16).

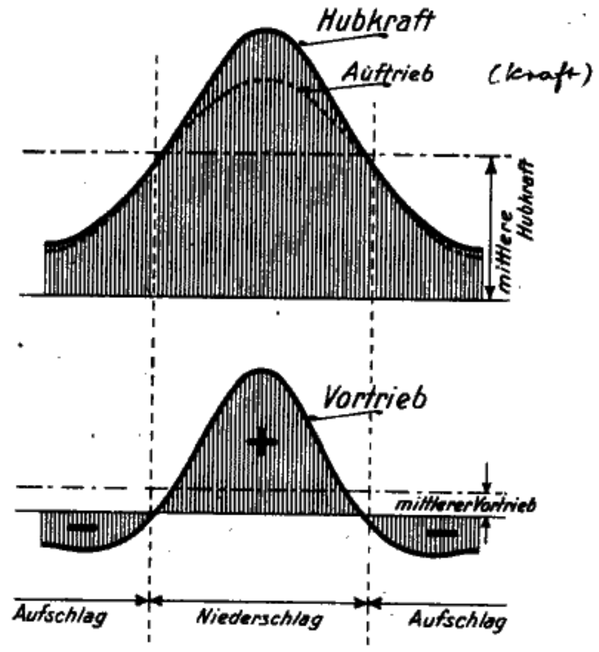


Abb. 16: Schlagflügeldiagramm einer Schwinge bei mittlerem Auftrieb. Bahnkurve und Profileigenschaften entsprechen Abb. 15.
oben: Hub- und Auftriebsverlauf,
unten: Vortriebsverlauf während einer vollen Schwingung.

Man erhält also im Falle der auftriebsbelasteten Schwinge eine wesentlich schlechtere Ausnutzung der Motorleistung. Weiterhin ist man gezwungen, einen stärkeren Motor zu verwenden, damit die große Niederschlagsarbeit von dem Motor aufgebracht wird. Diese ungünstigen Verhältnisse bei der auftriebsbelasteten Schwinge kann man dadurch verbessern, daß man den Flügel durch eine zusätzliche Federung so aufhängt, daß der mittlere Auftrieb durch die Federspannung ausgeglichen wird. Dann wird die Feder beim Aufschlag gespannt und gibt ihre Energie beim Niederschlag als zusätzliche

Leistung ab, so daß die Belastung des Motors im Auf- und Niederschlag 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 angetrieben werden.

Wir wollen nun noch einmal kurz überlegen, was einträte, wenn wir die Schwinge stets so zur Bahnneigung einstellten, daß während des Auf- und Niederschlages kein Auftriebswechsel stattfände. Wir nehmen an, daß die Schwinge stets einen bestimmten positiven Auftrieb liefert und bestimmen aus der Kräftezerlegung beim Auf- und Niederschlag unter gleichen Winkeln den sich als Mittelwert beider Stellungen ergebenden Vortrieb (Abb. 17). Beim Aufschlag erhalten

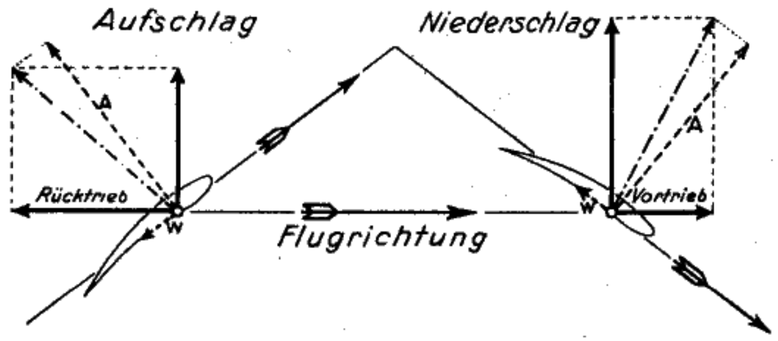


Abb. 17: Vergleich der Kraftwirkung beim Auf- und Niederschlag eines Schlagflügels bei gleichbleibendem Auftrieb.

wir infolge der Rückwärtsneigung der Gesamtluftkraft einen Rücktrieb, während wir beim Niederschlag Vortrieb erzeugen. Bei der Betrachtung der Abbildung erkennt 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 Vortriebskomponente um den Widerstand vermindert wird. Als Mittelwert von Aufschlag und Niederschlag bleibt also der Widerstand übrig, der zu dem betreffenden Auftrieb gehört.

Wir kommen demnach zu dem wesentlichen Schluß, daß die Erzeugung eines Vortriebs gebunden ist an einen Auftriebswechsel zwischen Auf- und Niederschlag, und zwar muß der Auftrieb beim Aufschlag stets kleiner sein als der Auftrieb 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 Idealfalle müßte man deshalb ein Profil haben, das beim Aufschlag große negative Auftriebe und beim Niederschlag große positive Auftriebe liefert. Das bedeutet die Verwendung eines in der Ausgangslage symmetri-

schen Verstellprofils. Der Vogelflügel besitzt derartige Eigenschaften, und es ist mit ein Grund für die elastische Ausbildung des Modellflügels, eine wenn auch begrenzte Verstellbarkeit zu erreichen.

Der dauernd wechselnde Auftrieb bedingt eine weitere physikalische Erscheinung, nämlich das durch den Auftriebswechsel hervorgerufene Ablösen von sogenannten Anfahrwirbeln. Im Augenblick, in dem sich ein Flügel aus der Null-Lage ohne Auftrieb so bewegt, daß eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Anstellwinkels eintritt, tritt eine Aenderung der Strömungsform ein, die nach einer gewissen Zeit in die zu diesem Anstellwinkel gehörige stationäre Auftriebsströmung übergeht. In diesem Uebergangsstadium muß die den Auftrieb erzeugende Zirkulation um den Flügel „angefahren" werden. Die Zirkulation um den Flügel kann nämlich nur dann entstehen, wenn eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Zirkulation als freier Wirbel durch die anfangs eintretende Umströmung der Hinterkante des Profils erzeugt wird. Im Augenblick der Anblasrichtungsänderung umströmt die Luft den Flügel zuerst so, daß kein

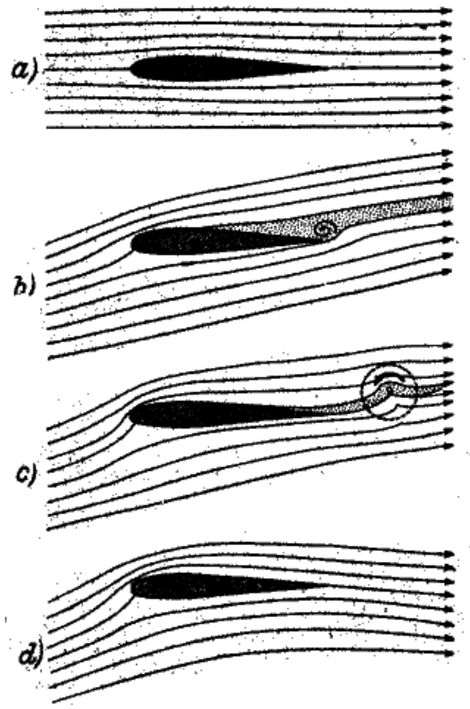


Abb. 18: Die Entstehung des Anfahrwirbels.
a) Anströmung ohne Auftrieb.
b) Zustand kurz nach der Aenderung des Anstellwinkels, Bildung des Anfahrwirbels.
c) Der Anfahrwirbel löst sich von der Hinterkante ab.
d) Voll entwickelte stationäre Auftriebsströmung.

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 Ablösung der Strömung an der Hinterkante einsetzt, welche die Entstehung eines Wirbels über der Hinterkante zur Folge hat. Dieser Wirbel hat entgegengesetzten Drehsinn zu der auftriebserzeugenden Zirkulation, 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 dem Profil vollständig an, d. h. die zur Auftriebserzeugung notwendige Zirkulation ist voll ausgebildet. Der von der Hinterkante erzeugte und nach hinten abwandernde Wirbel wird der Anfahrwirbel genannt. Die Zeitspanne, in der dieser ganze Vorgang stattfindet, bedingt, daß der Auftrieb erst kurze Zeit nach dem Eintreten der neuen Bewegungsrichtung einsetzt. Wird nun andererseits wie beim Schlagflügel eine periodische Aenderung des Auftriebs zur Herstellung eines entsprechenden Vortriebs notwendig, so muß ein dauerndes Entstehen von Anfahrwirbeln stattfinden. Der Flügel wird sich also niemals in einem stationären Strömungszustand befinden, sondern immer in einem Uebergangszustand, und es werden sich dauernd an der Hinterkante Anfahrwirbel ablösen. Damit nun die Auftriebsänderung möglichst schnell vor sich geht, muß die Erzeugung der notwendigen Anfahrwirbel ebenfalls, wenn möglich, beschleunigt werden. Bei einem starren Flügel muß die Luftströmung die Erzeugung hervorrufen. Verwendet man jedoch einen Flügel mit einer elastischen Hinterkante, so wird durch das mechanisch bedingte Schwingen der Hinterkante das Entstehen der Anfahrwirbel 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 Anstellwinkeländerung so gekoppelt sein, daß die Wirbel auch zu dem richtigen Zeitpunkt und in dem richtigen Drehsinn entstehen. Es ist nämlich durchaus möglich, daß die Hinterkante infolge Massenverteilung und Elastizität eine Schwingung ausführt, die wohl Anfahrwirbel erzeugt, aber im verkehrten Drehsinn, so daß die Auftriebserhöhung bei Anstellwinkelvergrößerung überhaupt nicht oder sogar in verkehrtem Sinne erfolgt. Ueber diesen Zusammenhang zwischen der Bewegung der Hinterkante und der Ablösung der Anfahrwirbel müssen noch eingehende Untersuchungen durchgeführt werden, um die günstigste Bewegung voraussagen zu können. Soviel können wir jedoch schon feststellen, daß die Hinterkante bei wachsendem Auftrieb

von oben nach unten schlagen muß, während bei Auftriebsverminderung eine umgekehrte Bewegung richtig ist. Dementsprechend muß sich die Hinterkante in der oberen Totpunktlage nach oben durchbiegen und beim Einsetzen des Niederschlages nach unten schlagen, während in dem unteren Totpunkt 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 Erscheinungen so eingehend hingewiesen habe, denn sie sind gewiß für denjenigen, 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 jeder, der sich mit dem Schwingenflug beschäftigt, kann nur dann auf diesem Gebiet etwas erreichen, wenn er sich über das Zustandekommen der Vortriebswirkung eines Schlagflügels im Klaren ist. Ich behaupte aber, daß das Problem der Erzeugung der Anfahrwirbel das eigentliche Problem des Schwingenfluges überhaupt ist und 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 Geradeausflug zu bringen, und man kann trotz schärfster Prüfung oft nicht feststellen, wo der Fehler steckt. Weiß man aber, daß die Verformung der Hinterkante den Vortrieb entscheidend beeinflußt, so wird man sofort verstehen, daß kleine Herstellungsungenauigkeiten der Bespannung Unterschiede in der Vortriebswirkung hervorrufen können, weil eben anders geartete Anfahrwirbel von beiden Flügeln ausgehen.

Wer sich diese Erscheinungen anschaulich darstellen will, dem kann ich nur raten, Versuche mit schwingend bewegten Profilen im Wasserkanal anzustellen. Man kann hier die Bildung der Anfahrwirbel sehr gut beobachten und auch die Wirkung der elastischen Hinterkante studieren.

Auch Rauchversuche am Schlagflügel des Modells lassen die Strömungserscheinungen erkennen.

Wie bereits angedeutet, steckt in der hinter dem Flügel entstehenden Wirbelstraße ein Teil der zum Antrieb des Flügels aufgewendeten Energie, und man muß bei der Betrachtung des Wirkungsgrades des Flügels diese Energie als Verlust in Rechnung setzen. Es ist leicht einzusehen, daß der Energieverlust, der durch die Erzeugung der Anfahrwirbel entsteht, mit größer werdendem Auftriebswechsel zwischen Auf- und Niederschlag anwächst. Der Energieverlust wird Null werden, wenn kein Auftriebswechsel eintritt. Wir haben aber weiter oben festgestellt, daß dann auch kein Vortrieb entsteht.

Denken wir uns also den Auftriebswechsel stufenweise erhöht, so wird Folgendes eintreten:

Der Vortrieb steigert sich und wird immer größer, je steiler der Verlauf der Bahnkurve ist.

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

Beide Wirkungen überkreuzen sich, und es muß für eine bestimmte Bahnkurve oder einen entsprechenden Auftriebswechsel einen günstigsten Ausgleich zwischen bester Vortriebserzeugung und geringstem Energieverlust in der Wirbelstraße geben. Leider 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 verschiedenartige vortriebserzeugende Schwingen einen Vergleichsmaßstab aufstellen, der es gestattet, unabhängig von der Dimension, d. h. unabhängig von Geschwindigkeit, Frequenz, Spannweite und Ausschlagwinkel, die Beobachtungsergebnisse miteinander zu vergleichen. Wir müssen hier nämlich zu einem ähnlichen Begriff für die Schwinge kommen, wie wir ihn bei den Luftschraubenuntersuchungen als Fortschrittsgrad kennen. Dazu

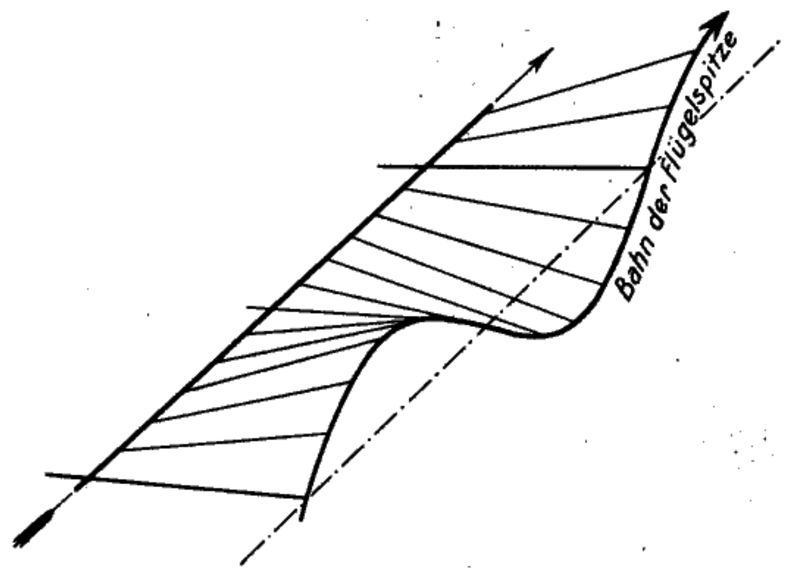


Abb. 19: Die Bahnfläche eines Schlagflügels.

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

auf- und abpendelt. Die Flügelteile in der Nähe dieser Achse beschreiben also einen kürzeren Ausschlagweg, während der Weg des Außenflügels am längsten ist. Da aber die ganze Schwinge sich mit gleicher Geschwindigkeit fortbewegt, werden demnach die inneren Flügelteile flache Bahnkurven durchlaufen, und an der Flügelspitze wird die Steilheit der Bahnkurve einen Größtwert annehmen. Die Schwinge durchläuft also während ihrer Fortbewegung eine wellenförmige Fläche, die auf einer Seite durch eine Linie, nämlich die Bahn 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 Bahnflächen 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 kreisende Bewegung, eine Vielzahl von Bahnflächen 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 Vergleichsmaßstab für verschiedenartige Betriebsverhältnisse zu gewinnen.

Wir setzen daher voraus, daß wir es im wesentlichen mit vertikal 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 Bahnkurve an der Flügelspitze festlegen, die der Definition des Fortschrittsgrades als Steigungswinkel an der Spitze des Luftschraubenblattes entspricht. Diese Neigung ist gekennzeichnet durch das Verhältnis der Fluggeschwindigkeit zur vertikalen Schlaggeschwindigkeit beim Durchgang durch die Mittellage.

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

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

Bezeichnen wir sodann den gesuchten Fortschrittsgrad der Bahnkurve 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 verschieden große Schwingen dann unter gleichen Betriebsverhältnissen

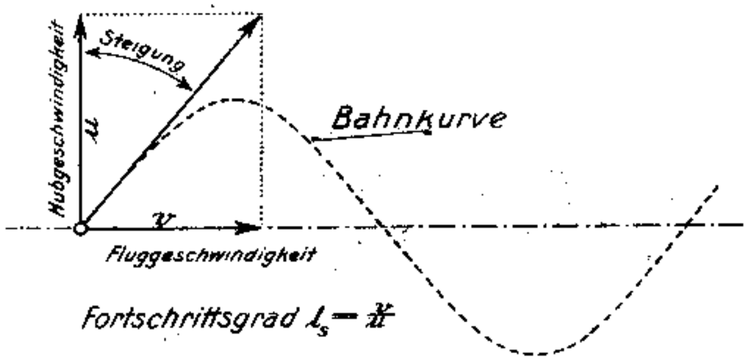


Abb. 20: Bestimmung des Fortschrittgrades eines Schlagflügels.

arbeiten, wenn sie gleiche Schwingenfortschrittsgrade aufweisen. Wir können auf diese Weise Versuchsergebnisse an Modellen und Beobachtungsergebnisse des Tierflugs miteinander vergleichen, um experimentell Aufschluß 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 Luftschraubenbetrachtung davon aus, daß die Wirkung der ganzen Schwinge durch die Eigenschaften eines Flügelschnittes, der die mittlere Bewegung zwischen Flügelspitze und Flügelwurzel ausführt, gekennzeichnet ist, und legen wir diesen Flügelschnitt wie bei der Luftschraube in 70 % der Flügellänge (R), dann können wir in erster Näherung sagen, daß wir den Bereich günstiger Wirkungsgrade der Vortriebserzeugung erreichen werden, wenn sich dieser Flügelschnitt 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 demnach 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:

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

Der Fortschrittsgrad ändert sich ja von der Drehachse zur Flügelspitze im Sinne einer stetigen Verkleinerung, 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 Abschluß 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:

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

Wenn wir also beispielsweise 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 an einem Beispiel erläutert, und zwar denken wir uns ein Modell mit einer normalen Geschwindigkeit von 8 m/sec, einer Schwingenlänge von R = 0,3 m und einem Ausschlagwinkel von, $\gamma = 80°$. 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.:

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

Setzen wir nun:

$$v = 8 \text{ m/sec}$$
$$R = 0{,}3 \text{ m}$$
$$\gamma = 80° \cdot \frac{\pi}{180} = 1{,}4 \text{ (Bogenmaß)}$$

ein, so erhalten wir für die Schlagzahl je Sekunde:

$$n_s = 13{,}6 \ ^1/\text{sec}$$

Auf die Schlagzahl je Minute umgerechnet, müssen wir die Schwinge, um günstige Betriebsverhältnisse zu erreichen, mit etwa 820 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

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

Demnach können wir erwarten, daß $\lambda_{s\ günst.}$ größer sein wird als 0,445. Nach eigenen Versuchsergebnissen, die allerdings noch wesentlich erweitert werden müssen, lag $\lambda_{s\ günst.}$ etwa bei 0,6. Es ist bemerkenswert, daß Messungsergebnisse an Luftschrauben den besten Fortschrittsgrad ebenfalls in der Gegend von $\lambda = 0{,}6$ liefern.

Insgesamt können wir aus der Betrachtung zusammenfassend Folgendes ableiten:

Für die Vortriebserzeugung mit Schwingen gibt es in ähnlicher Weise wie bei den Luftschrauben einen Bereich günstigster Wirkungsgrade, der durch eine bestimmte Steilheit der Bahnkurve 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 Ausschlagwinkel ist, umso kleiner darf die Schwingenlänge und die Schlagzahl sein. Eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeit bedingt eine gleichzeitige Vergrößerung der Schlagzahl, wenn Flügellänge und Ausschlagwinkel erhalten bleiben.

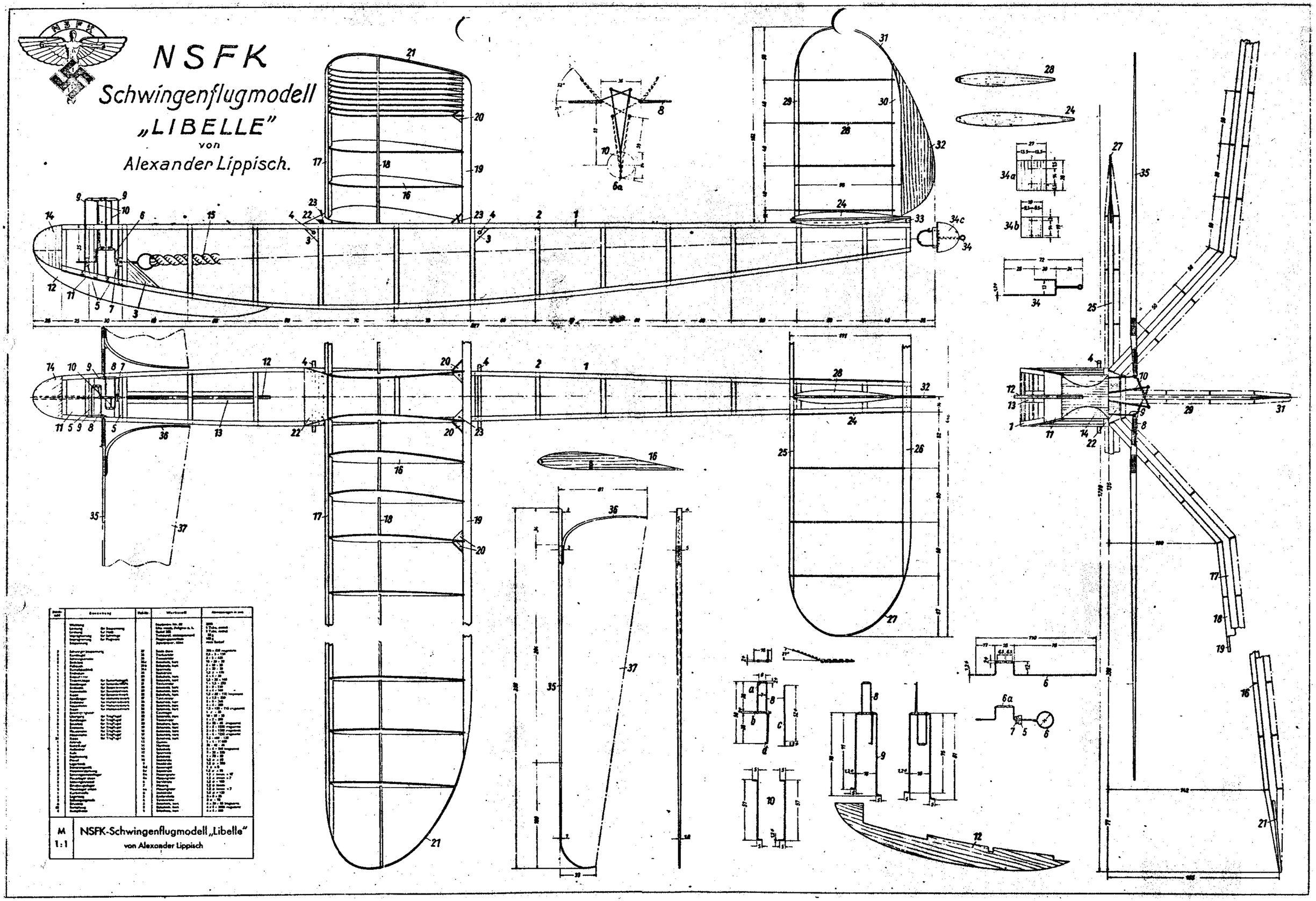
Diese Gesetzmäßigkeiten muß man unbedingt im Auge behalten, wenn man sich ernsthaft mit dem Bau von Schwingenflugmodellen befassen will. Schon bei der Größenbemessung der an sich viel einfacheren Luftschrauben werden oft beträchtliche Fehler gemacht. Umso mehr muß bei der Durchführung von Schwingenflugversuchen jeder, der sich damit befaßt, die notwendigen Grundlagen so weit beherrschen, daß die Herstellung von Schwingenflugmodellen nicht Bastelei, sondern Mitarbeit an einem Problem wird, zu dessen Lösung jeder ernsthaft Arbeitende beitragen kann.

NSFK

Schwingenflugmodell „LIBELLE"

von

Alexander Lippisch.



M	NSFK-Schwingenflugmodell „Libelle"
1:1	von Alexander Lippisch