

Der Vogelflug in Bezug zur Technik

Jahr 2003



*Maturaarbeit des Pädagogischen
Ausbildungszentrums NMS
vorgelegt von Thomas Schmid
Betreuer der Arbeit: Armin Thalmann
Koreferent der Arbeit: Stephan
Krummenacher*

Inhaltsverzeichnis:

<u>Kapitel/Unterkapitel:</u>	<u>Seitenzahl:</u>
Vorwort	3
Einleitende Gedanken und Ziele meiner Arbeit	3
Wie ich die Arbeit geschrieben habe	4
1.1 Die Geschichte der Luftfahrt und Technik in Zusammenhang zum Vogelflug und seiner Entstehung	5-10
1.2 Bedeutung des Ersten und Zweiten Weltkriegs auf die Fliegerei	10-11
1.3 Fliegen und Technik heute	12-14
2.1 Warum die Vögel und Flugzeuge fliegen	15-16
2.2 Entstehung des Auftriebs	16-17
2.3 Doch wie erzeugen wir möglichst viel Auftrieb?	18
2.4 Die drei Vogel oder Flugzeugachsen	19-20
2.5 Die Kräfte im stationären, unbeschleunigten Horizontalflug	20
2.6 Die Kräfte im Steigflug	21
2.7 Die Kräfte im Sinkflug	21-22
2.8 Die Gleitzahl	22
2.9 Die Kräfte im Kurvenflug	22-24
2.10 Probleme zwischen Stabilität und Steuerbarkeit	24
2.11 Wie entsteht eigentlich Luftwiderstand ?	25-26
2.12 Doch wie lässt sich dieser grosse Luftwiderstandsunterschied der verschiedenen Körper erklären? (Beschrieb des Strömungsbildes eines Flügelprofils)	27-28
2.13 Der Interferenzwiderstand	28
2.14 Der induzierte Widerstand	29-30
2.15 Einflüsse auf den induzierten Widerstand	30-31
3.1 Über die Funktionsweise des Flügelschlages	32
3.2 Zum Bewegungsablauf des Flügelschlages	32-33
3.3 Anpassungsfähigkeit und Anforderungen an die Vogelflügel, um das komplexe Fliegen eines Vogels auszuführen	34-37
3.4 Voraussetzung für diese Agilität und Besonderheit des Vogelfluges sind:	37
3.5 Meine Meinung über die Bedeutung und Zukunft von Flugzeugen mit schlagenden Flügeln	38-40
3.6 Neueste „Detailverbesserung“ am Flugzeug zur Verringerung des induzierten Widerstandes	40-46
3.7 Schlussgedanken	46
Quellenverzeichnis	47

Vorwort

Da ich selbst begeisterter Segelflieger bin und mich immer für den Vogelflug interessiert habe, beschloss ich meine Maturaarbeit in diesem Bereich zu schreiben.

Mein Titel deutet darauf hin, dass ich das Wunderwerk Vogel mit der Technik und Entwicklung des Flugzeugbaus verbinden möchte.

In der Segelfliegertheorie habe ich einiges über die Grundlagen des Fluges, Aerodynamik und Flugzeugbau erfahren und, weil ich selbst fliege, kann ich mir ein bisschen vorstellen, was es bedeutet wie ein Vogel zu fliegen und welche Anforderungen sich dabei stellen.

Doch ich muss auch zugeben, dass es mir nie gelingen wird, alle Geheimnisse des Vogelfluges zu verstehen und zu erfassen.

Einleitende Gedanken und Ziele meiner Arbeit

In meiner Arbeit beschäftige ich mich mit dem Vogelflug, dieser wird in Bezug zur Technik gesetzt. Es ist mir wichtig, denn Vogelflug in seiner Vielfältigkeit und Besonderheit darzustellen und seine Funktionsweise zu erklären. Wir werden uns dabei nicht nur auf den Flügelschlag konzentrieren, sondern auch anschauen, welche Anforderungen an einen Vogel gestellt sind, um so durch die Lüfte zu schweben und, welche Vorteile ein Vogel gegenüber einem Flugzeug aufweist. Besonders wichtig ist mir ausserdem zu zeigen, dass Flugzeuge und Vögel nach dem gleichen Prinzip fliegen und mit ähnlichen Problemen zu kämpfen haben und hatten.

Auch die Frage, „Was haben wir in der Technik den Vögeln abgeschaut?“, scheint mir wichtig zu sein. Doch um eine Ahnung von dem Geheimnis des Fliegens zu bekommen und dem Flügelschlag sowie der Erfindung und Entwicklung von „Winggrids“, ist es zweckmässig, Bescheid zu wissen, in Sachen Aerodynamik und Grundlagen des Fluges, wie auch den natürlichen Kräften und Gleichgewichten im Flug.

Am Anfang schauen wir uns Parallelen und Gemeinsamkeiten in der Entwicklungsgeschichte von Vogel und Flugzeug an. Dabei versuche ich die beiden Entwicklungsgeschichten sinnvoll zu verknüpfen und verbinden, wobei ich trotzdem noch auf die Bedeutung des Krieges auf die Luftfahrt hinweise.

In der Vergangenheit angefangen, kommen wir dann wieder in die Gegenwart zurück und schauen uns den heutigen Entwicklungsstand an. Bevor wir dann den komplexen Flügelschlag, die Entwicklung von Ornithoptermodellen und die Zukunft der Technik sowie eine neue technische Errungenschaft nach natürlichem Vorbild anschauen, werden wir uns umgehend mit Aerodynamik beschäftigen.

Wie ich die Arbeit geschrieben habe

- Segelflugtheoriewissen
- Beobachtung von fliegenden Vögeln in der Natur und auf DVD, dort konnte ich den Vogelflug in Zeitlupe anschauen um mir ein Bild dieser Bewegung zu machen.
- Lesen von Sachbüchern im Bereich Bionik und Aerodynamik
- Lesen und Lernen von vielen Texten und Berichten im Internet
- Gespräch mit einem jungen Physiker auf dem Flugplatz in sowie einem Maschinen-Ingenieuren, der sich mit Neuentwicklung von besseren Flugzeugmotoren und Tragflächen beschäftigt.
- Allgemein Gespräche mit erfahrenen Segelfliegern, die immer was zu erzählen haben.
- Meine kleine, eigene Flugerfahrung, die mir hilft, Dinge besser zu verstehen und vorzustellen.
- Studieren von Grafiken und Formeln (die für mich vielfach unverständlich waren), ich versuchte einfach einige Punkte, die ich teilweise begriffen hatte und als wichtig empfand zu interpretieren und verstehen
- Anschauen von Ornithoptermodellen und Abbildungen von Vögeln

Teil 1: Der Vogelflug in Bezug zur Technik

1.1 Die Geschichte der Luftfahrt und Technik im Zusammenhang zum Vogelflug und seiner Entstehung.

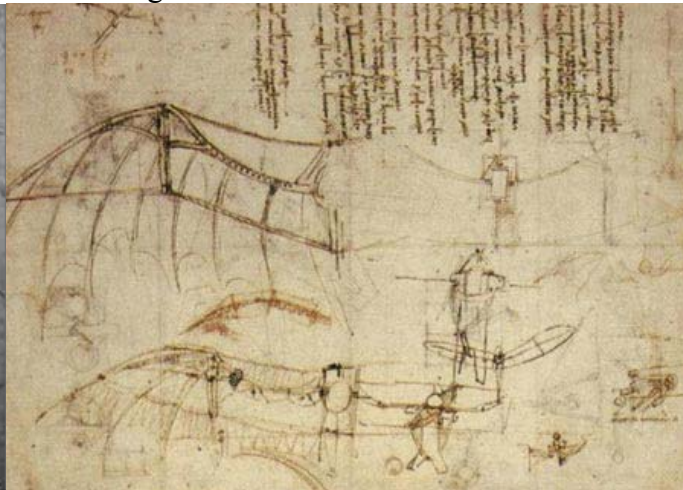
Der Traum vom Fliegen, ist wahrscheinlich so alt, wie die Menschheit selbst. Schon immer schauten die Menschen zu den Vögeln empor und wünschten sich innerlich selbst abzuheben und es ihnen gleich zu tun.

Dank dem Erfindungsgeist, der Beobachtungsgabe, dem Mut, dem Fleiss und der unglaublichen Beharrlichkeit, trotz den unzähligen Misserfolgen und dem Gespött der Leute an seinen Ideen und Fluggeräten weiterzubauen, ist es einigen Menschen gelungen, diesen Traum bis zu einem gewissen Grad zu verwirklichen. Einer der wichtigsten Erfinder und Denker, der seiner Zeit weit voraus war, hiess Leonardo da Vinci. Er hat schon um 1500 n. Chr. Flugmaschinen mit beweglichen Flügeln entworfen. Leider wurden seine Maschinen, die er aus eigener Körperkraft betreiben wollte, viel zu schwer zum Fliegen.

Abbildung 1



Abbildung 2



In der rechten Abbildung sieht man Skizzen. Sie zeigen eine Art Bauplan von Ornithoptern, die aus eigener Körperkraft betrieben werden sollten.

Auch die Erfindung des Hubschraubers ist theoretisch ihm zuzuschreiben. Ausserdem hatte da Vinci die Idee mit heisser Luft in einem Ballon in den Himmel zu steigen, was den Gebrüdern Montgolfier 300 Jahre später, im Jahr 1783 in Paris, schlussendlich auch gelungen ist. Dieses Schweben mit Ballon ist jedoch nicht mit dem Fliegen der Vögel vergleichbar, deshalb versuchte man sich Flügel, wie die Vögel haben zu basteln.

Ein Pionier auf diesem Gebiet war Otto Lilienthal, er war einer der ersten, die durch die Lüfte schwebten. Er rannte mit seinem Hängegleiter einfach einen 15m hohen Hügel herab und gleitete dann bis zu 300m durch die Luft. Diese Gleitflüge, die am Anfang eher wie Luftsprünge mit anschliessendem Absturz aussahen, entwickelten sich langsam zu kontrollierbaren Schwebeflügen.

Abbildung 3



Abbildung 4



Auf diesen Bildern sieht man Otto Lilienthal, der von seinem selbst errichteten Hügel springt und schon beachtliche Gleitflüge zu Stande bringt.

Otto Lilienthal war, wie da Vinci auch, ein guter Beobachter. Er schaute tagelang den Möwen und Störchen beim Flug zu. Durch sein technisches, physikalisches und praktisches Geschick, konnte er seine Flugapparate ständig verbessern und durch seine Erfahrungen z.B. über die richtige Lage des Schwerpunktes, geeignete Wahl der Flügelwölbung, Analyse des Vogelfluges und physikalische Erklärung des Auftriebes, hat er viel zum Fortschritt beigetragen.

Nicht nur Otto Lilienthal und die vielen anderen Tüftler, hatten Mühe die richtige Schwerpunktlage(Massenmittelpunkt des Flugkörpers) und ein geeignetes Flügelprofil zu finden, nein, auch die Evolution hatte am Anfang ihre Schwierigkeiten.

Spannend ist, dass die Flugsaurier, die ja am Anfang aus Wasserreptilien entstanden sind, mit ähnlichen Problemen zu kämpfen hatten. Die Flügel der ersten Flugsaurier, die mit Haut bespannt waren, haben sich nach neuen Erkenntnissen aus den Flossen von schnell schwimmenden Wasserreptilien entwickelt. Denn erst im Wasser, das etwa 800 mal dichter ist als Luft, konnte sich eine so komplexe Vortriebsart wie der Schlagflug entwickeln.

Gründe dafür sind:

- die zweckmässige Bewegung zur Vortriebserzeugung konnte stets verbessert werden
- die Schwimm- und Flugmuskulatur konnte sich parallel zur Flügelvergrösserung anpassen
- Bewegungen des Wassers um die Hand sind viel besser fühlbar, es ist deshalb leichter, die geeignete Vortriebsart durch Ausprobieren herauszufinden
- die Verletzungsgefahr aus geringer Höhe ins Wasser zu fallen, ist viel geringer als auf dem Land, wo solche Flugversuche häufig tödlich enden und deshalb nichts zur Evolution beitragen können

Das Grundprinzip zur Fortbewegung in diesen zwei Medien ist ähnlich, Wasser oder Luft, wird nach hinten beschleunigt und daraus entsteht eine Kraft respektive Bewegung nach vorne (Kraft= Masse mal Beschleunigung). Der Unterschied in der Luft besteht jedoch darin, nicht nur die geringere Widerstandskraft durch Vortrieb zu kompensieren, sondern gleichzeitig noch Auftrieb zu erzeugen um die Gewichtskraft auszugleichen.

Abbildung 5

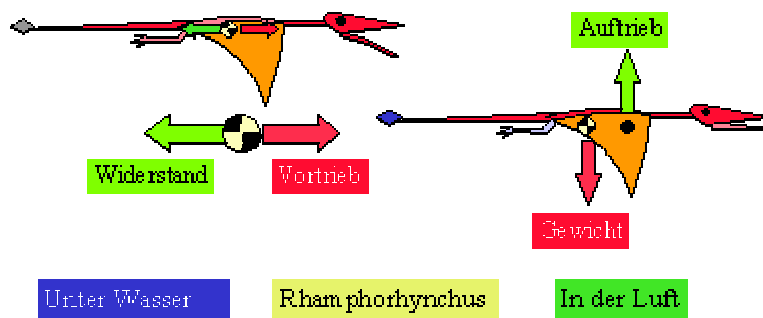
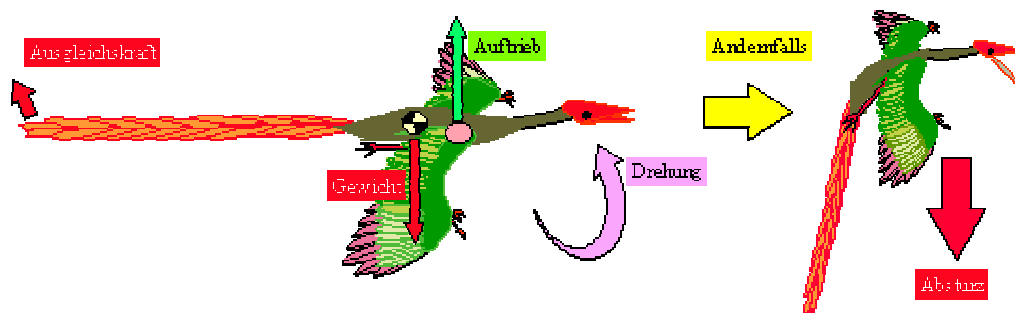


Bild der Entwicklung von Wasserreptilien zu einfachen Flugsauriern, mit bespannter Haut, anstatt Federn.

Die ersten fliegenden Tiere waren Oberflächengleiter (wie Lilienthal). Da es im Wasser nicht so sehr auf die richtige Schwerpunktslage ankam, hatten die ersten Flugsaurier das Problem, dass sie viel zu schwanzlastig im Flug waren. Sie liessen deshalb zum Ausgleich ihren Schwanz übers Wasser gleiten und die davon entstehende Reibungskraft, sorgte für ein Gleichgewicht im Flug.

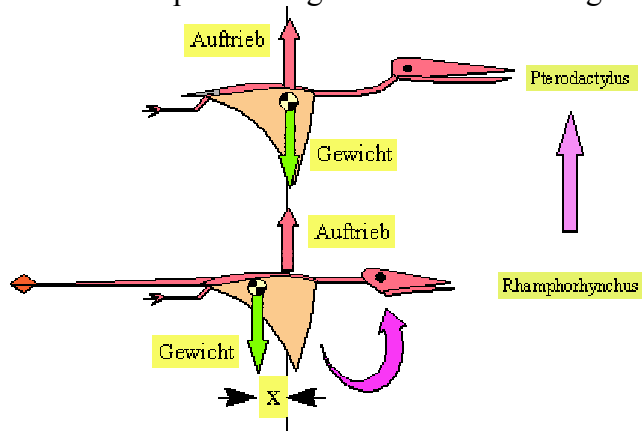
Abbildung 6



Hier sieht man, wie der linke Flugsaurier das Kräftegleichgewicht aufrechterhält, indem er den Schwanz übers Wasser gleiten lässt. Tut er dies nicht, so hat er ein Problem wie der Flugsaurier neben ihm. Er stürzt dann ins Wasser.

Erst als sich durch die Evolution der Schwerpunkt weiter nach vorne verschoben hatte, konnten sich die Flugsaurier, die später von den Vögeln mit Federn verdrängt wurden, in die Lüfte emporschwingen.

Abbildung 7



Hier sieht man das Problem. Der untere Flugsaurier war nie fähig zu fliegen, denn wenn er einen positiven Anstellwinkel einnahm und die Auftriebskraft somit stieg, so drängte es ihn zu immer grösseren Anstellwinkeln, bis schlussendlich die Strömung abbriss und er wieder im Wasser sass.

Wie viele Erfinder früher, hatte auch Otto Lilienthal am Anfang das Ziel einen Flugapparat mit schlagenden Flügeln zu konstruieren, doch er sah schnell ein, dass der menschliche Körper dafür nicht geschaffen ist.

Denn die Vögel besitzen ein enorm leichtes Skelett. Im Gegensatz zum Menschen besitzen sie hohle Knochen, die innen zahlreiche Verstrebungen aufweisen. Das verleiht den Knochen hohe Festigkeit(Widerstandsfähigkeit gegen Kräfte) und eine hohe Steifigkeit (Widerstandsfähigkeit gegen Biegen, Verdrehen und Deformation), ausserdem wird mit diesen hohlen Knochen Gewicht gespart, was für das Fliegen unheimlich wichtig ist, denn jedes zusätzliche Gramm bedeutet ein Mehrbedarf an Energie. Nicht nur die stabilen und leichten Knochen zeichnen einen Vogel aus, sondern auch ihre enorm starke Rücken- und Brustmuskulatur. Lilienthal schrieb, dass wenn der Mensch die gleiche Leistung im Schlagflug erbringen will wie ein Vogel, dazu einen etwa 1.5 m dicken Brustmuskel benötigen würde.

Wer denkt die Weiterentwicklung, Verbesserung von Flugzeugen, Materialien, das Beobachten und Nachahmen des natürlichen Vogelfluges mit all seinen Raffinessen und Genialitäten, hat seither an Bedeutung verloren, der täuscht sich.

Rund 20 Jahre nach dem ersten Flug von Lilienthal unternehmen die Gebrüder Wright die ersten gesteuerten Motorflüge der Geschichte. Gesteuert wurde das Fliegen jetzt nicht mehr durch blosse Gewichtsverlagerung, sondern durch den Steuerknüppel und die Seitenruderpedale, die mittels Steuerstangen, Seilen und Umlenkrollen mit den Steuerflächen, wie Höhenruder, Seitenruder und später Querruder verbunden sind. Dadurch wurde das Fliegen bequemer und berechenbarer, denn die Steuerflächen(auch Steuerruder genannt) erzeugen zusammen mit ihren Flossen (unbeweglicher Teil vor dem Steuerruder) Momente um den Schwerpunkt des Flugzeuges. Da die Bewegung des Flugzeuges von den angreifenden Kräften abhängt, die während des Fluges auf das Flugzeug einwirken, konnte man von nun an die Bewegung des Fluges vom Cockpit aus bequem steuern.

Abbildung 8



Hier sieht man einen der Gebrüder Wright, der mit einem der ersten Motorflugzeuge vor einem Publikum durch die Lüfte fliegt.

Auch hier gibt es Ähnlichkeiten zum Vogelflug, denn die Vögel besitzen auch Schwanzfedern, die sie zur Steuerung des Fluges brauchen. Ausserdem erzielen sie mit ihren Federn im Hand und Armbereich einen ähnlichen Effekt wie die Querruder im Kurvenflug.

Ein neuer Vorteil war, dass man mittels einem Propeller aus dem Stand Schub erzeugen konnte, deshalb war es nun auch möglich auf flachem Terrain zu starten.

Somit wurde das Fliegen auch für die Wirtschaft und Medien interessant, es wurden viele Preise ausgesetzt, unter anderem auch für die Erstüberfliegung des Ärmelkanals, was dem Franzosen Louis Blerot 1909 gelang.

Die Erfindung des Otto Motors hat viele Erfinder mit imposanten, genialen, jedoch wenig erfolgversprechenden Ideen beflügelt. Viele Bastler versuchten motorbetriebene Flugapparate mit schlagenden Flügeln oder sich auf und ab bewegendem Tellern zu konstruieren, diese Apparate fielen leider meistens schon nach den ersten Metern des Starts auseinander, weil das Material den Belastungen dieser Schwingungen nicht standhalten konnte.

Abbildung 9



Hier das Bild eines frühen Ornithoptermodells, das jedoch nie zu fliegen vermochte, dafür aber interessant aussieht.

Nicht nur für die Flugzeuge braucht der Start viel Energie und Schub bis es möglich ist abzuheben, nein, auch die grossen Vögel von mehr als 2kg Gewicht sind nicht mehr in der Lage ohne Anfangsgeschwindigkeit oder starkem Gegenwind abzuheben. Deshalb rennen die Vögel am Anfang und schlagen zusätzlich mit den Flügeln bis sie ihre Startgeschwindigkeit erreicht haben, erst dann werden die Füsse eingefahren und es kann abgehoben werden. Das gleiche gilt für Flugzeuge, auch sie benötigen eine Mindestgeschwindigkeit* bis am Steuerknüppel gezogen werden kann und das Flugzeug abhebt.

*(kleinste Geschwindigkeit bei der das Flugzeug steuerbar ist und die Auftriebskraft die Gewichtskraft auszugleichen vermag)

Abbildung 10



Hier sieht man die Abbildung eines startenden Schwans, der mühevoll versucht abzuheben. Dazu stösst er sich mit den Füßen am Wasser ab und schlägt zusätzlich mit den Flügeln.

1.2 Bedeutung des Ersten und Zweiten Weltkriegs auf die Fliegerei

So traurig es tönt, es bleibt zu sagen, dass der Erste Weltkrieg einen bedeutenden Einfluss auf die Fliegerei ausgeübt hat, denn es wurde viel Geld ausgegeben für die Konstruktion von bewaffneten Flugzeugen, die meist mit Maschinengewehren und von Hand abwerfbaren Waffen ausgerüstet waren. Die Kriegsführer sahen ein, dass von der Luft aus praktisch alles angegriffen werden kann und machten sich diese neue Art der Kriegsführung zunutze.

Als die Deutschen 1918 den Ersten Weltkrieg verloren hatten, waren sie nicht mehr berechtigt Motorflug zu betreiben. Es setzte aus diesem Grund eine grosse Weiterentwicklung und Verbesserung im Bereich Segelflug ein. Eifrig tüftelten Techniker, Studenten und Ingenieure an der Optimierung der Segelflugleistungen herum. Man war bemüht die Flugzeuge möglichst leicht und stabil zu bauen und äusserst aerodynamisch zu gestalten.

Die Entwicklung schritt rasant voran und der Gleitflug als Sport trat stark in den Vordergrund. Im Laufe der Jahre wurden dann auch Segelflugzeuge für verschiedene Verwendungszwecke geschaffen z.B. Schul-, Übungs- und Leistungsflugzeuge, später dann auch noch Kunstflugzeuge. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass deutsche Segelflugzeuge im Segelflugsport sehr beliebt und geschätzt werden.

Abbildung 11



Hier ein Abbild eines ganz alten Segelflugzeuges (es handelt sich entweder um den Bauernadler oder um den Zögling). Ein Cockpit oder eine Windschutzscheibe ist noch nicht vorhanden.

Als dann Hitler an die Macht kam, fing man 1935 wieder mit dem Motorfliegen an. Viele Flugschulen wurden vom Staat unterstützt und der Jugend wurde das Fliegen schmackhaft gemacht. Dank dem Militär konnten sich viele Jugendliche den Traum vom Fliegen erfüllen. Als man sich dann für den Krieg vorbereitete, wurden Unmengen von Geld in die Entwicklung von Kriegsflugzeugen, Errichtung von Windkanälen und Erforschung der Aerodynamik hineingesteckt. In dieser Zeit hatte Deutschland die Führung in der Luftfahrt und Erforschung der Aerodynamik und Flugmechanik. Schon an der Volksschule lehrte man den Kindern im Physikunterricht, wie und warum ein Flugzeug fliegt. Während des Zweiten Weltkriegs entwickelte man die grausamen Riesenbomber mit ihren grosse Motoren und der riesengrossen Transportfähigkeit sowie die wendigen und schnellen Kampfflugzeuge.

Abbildung 12



Ein Bild mit deutschen Kampfflugzeugen aus dem Zeiten Weltkrieg.

Die Zerstörungskraft durch diese neue Art des Luftangriffs war gewaltig, durch die Bombardierungen wurden hunderttausend Menschen getötet. Noch während des Krieges wurde der Düsenantrieb erfunden, mit Düsenflugzeugen war es möglich doppelt so schnell und hoch zu fliegen. Als der Krieg zu Ende war, wurden die Passagierflüge langsam immer beliebter und schliesslich war das Fliegen nicht unbedingt mehr das Privileg der Reichen. Als dann serienmassig Passagierflugzeuge konstruiert und gebaut wurden, erlebte die Zivilluftfahrt einen neuen Aufschwung. Das Flugzeug wurde das beliebteste Transportmittel für grosse Distanzen und Reisen.

1.3 Fliegen und Technik heute

Heute ist wahrscheinlich fast Jeder aus den reichen Industrieländern einmal mit einem Flugzeug in die Ferien geflogen. Die heutigen Passagierflugzeuge sind seither sparsamer, leiser und geräumiger geworden, auch für die Piloten hat sich viel geändert, denn die zuverlässigen Autopiloten steuern das Flugzeug durch die vorgegebenen Flugruten. Ausser beim Start, der Landung und natürlich bei einem technischen Defekt oder bei einer Notsituation, braucht es noch fliegerisches Können, doch theoretisch sind die Systeme und Sensoren genügend ausgereift, dass die Landung und der Start vom Autopiloten übernommen werden könnte.

Ich möchte nicht sagen, dass ein Pilot heute nichts mehr zu tun hat, denn er muss ja noch Funken und seine Maschine mit Hilfe der Kontrollstationen und Fluglotsen durch den aktiv beflogenen Luftraum führen. Durch die Terroranschläge und Luftpiraterie wird die Freude an der Luftfahrt gegenwärtig ein bisschen getrübt, was aus ökologischer Sicht vielleicht gar nicht so schlecht ist.

Denn das Fliegen braucht immer noch enorme Mengen an Kerosin z.B. hat mir ein junger Pilot von Swiss gesagt, auf 100km brauche ein Verkehrsflugzeug pro Passagier etwa soviel wie ein normales Auto für diese Strecke brauchen würde. Kurz gesagt, ein sparsames Flugzeug benötigt für 100km (200 Leute mal 5 Liter Kerosin) etwa 1 Tonnen Kerosin. Die meisten Leute benötigen das Flugzeug jedoch nur, wenn sie weite Strecken zurücklegen.

Ein Beispiel: Das Ehepaar Meier fliegt für 1 Woche von Bern aus nach Sydney. Dazu benötigen sie allein für die Hin und Rückfahrt 4 mal 15840km mal 0.05L pro Km = ergibt 3.168 Tonnen Kerosin für ihre Reise. Selbstverständlich kommt dann noch der Energieverbrauch für Klimaanlage, Fahrzeuge, Busse und Elektrizität hinzu. Ich muss darauf hinweisen, dass dies ein grobes Rechenbeispiel ist, denn wahrscheinlich müsste man noch Zwischenlanden, was wiederum zu grossem Mehrenergieverbrauch führen würde.

Doch nicht nur bei den Passagierflugzeugen hat sich die Fliegerei und Technik weiterentwickelt, sondern auch bei den Kampffjets, Ultralightfliegern, Gleitschirmen, Wasserflugzeugen, Fallschirmen, Deltaseglern, Modellfliegern/Helikoptern, Segelflugzeugen, Kunstfliegern, Ornithoptern usw.

Wie die Evolution seit dem Auftreten der ersten Formen der geflügelten Fischjäger vor etwa 200 Mio. Jahren eine unheimliche Artenvielfalt von Vögeln entwickelt hat, so haben sich auch seit dem Auftreten der ersten Gleitflieger viele Arten von Flugzeugen entwickelt.

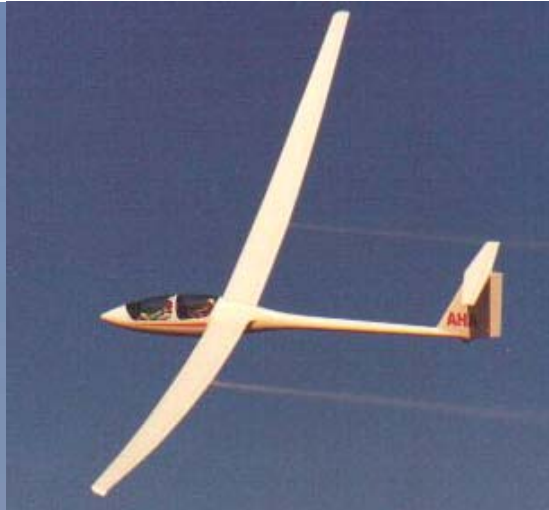
Jede Art, ob bei Vögeln oder Flugzeugen, ist für einen bestimmten Zweck oder für bestimmte Eigenschaften ausgelegt. Beispiele: hohe/niedrige Fluggeschwindigkeit, gute Gleitflugeigenschaften(möglichst geringer Höhenverlust pro zurückgelegte Strecke), gute Schnellflugeigenschaften, hohe Manövrierbarkeit und Wendigkeit , gute und stabile Flugeigenschaften, grosse/kleine Spannweite, Flügelfläche, gutmütige Langsamflugeigenschaften usw.

Jedenfalls stellt jede Art ein Kompromiss dar. Es ist praktisch unmöglich ein Flugzeug oder einen Vogel zu bauen, der allen Anforderungen gerecht werden kann. Interessant ist es beispielsweise, einen Albatros, also den besten und grössten Segelflieger der Vögel, mit einem hoch technisierten Hochleistungssegelflugzeug zu vergleichen, denn beide besitzen ähnliche Eigenschaften und sind ähnlich aufgebaut.

Abbildung 13



Abbildung 14



Hier sieht man ein Bild vom Albatross und einem Hochleistungssegelflugzeug(ASH-25).

Beispiele von Gemeinsamkeiten:

- hohe Spannweite bei geringer Flügelbreite (hohe Streckung)
- geringer Luftwiderstand durch eine sehr aerodynamisch angepasste Form
- gute Gleitflugeigenschaften(hohe Gleitzahlen)
- gutes Flugverhalten im engen Kreisen in der Thermik(warme aufsteigende Luft)
- raffinierte Leichtbauweise
- geringe Breite des Flügels (eigentlich Flügeltiefe)
- Profil produziert viel Auftrieb bei mittleren Geschwindigkeiten
- rein optisch betrachtet gefällt mir die Eleganz und Leichtigkeit der Flugweise

Ein anderes Beispiel ist einen Greifvogel wie der Falke oder Adler mit einem Kampflugzeug der Luftwaffe, wie zum Beispiel der FA-18 zu vergleichen.

Abbildung 15

Abbildung 16



Auf diesem Bild ist ein Adler und eine FA-18 abgebildet.

Gemeinsamkeiten hierbei wären:

- geringere Spannweite (kleine Streckung)
- kleinere Flügelflächen
- gute Schnellflugeigenschaften
- hohe Wendigkeit und Manövrierbarkeit
- hohe Belastbarkeit
- schlechtere Gleitflugeigenschaften bei mittleren Geschwindigkeiten
- grobe, stabile Bauweise
- für hohe Geschwindigkeiten angepasstes Flügelprofil
- hohe Flächenbelastungen auf dem Tragflügel

Ich hoffe, es ist jetzt ersichtlich, dass Mensch und Vogel nach den gleichen Prinzipien fliegen und, dass der Vogel der Technik immer noch Meilenweit voraus ist.

Wie sich die Technik weiterentwickelt und von den 200 Mio. Jahren Erfahrung der Natur im Vogelbau profitieren kann, werden wir teilweise später noch anschauen, denn ein relativ neuer Wissenschaftsbereich, die Bionik, das heisst die Wissenschaft, die versucht Biologie und Technik zu verbinden und technische Probleme nach biologischem Vorbild zu lösen, rückt heute zunehmend in den Vordergrund.

Ausserdem wollen wir uns mit dem Schlagflug beschäftigen und seine Besonderheiten kennen lernen. Doch bevor wir uns mit diesen Neuentwicklungen und Genialitäten der Natur überhaupt beschäftigen können, ist es zweckmässig vorher etwas über die Grundlagen des Fluges und über die Aerodynamik zu erfahren.

Teil 2: Der Vogelflug in Bezug zur Technik

2.1 Warum die Vögel und Flugzeuge Fliegen

Um dies zu verstehen, beschäftigen wir uns mit den Grundlagen des Fluges und der Aerodynamik, einer Wissenschaft, die sich mit der Lehre von strömenden Gasen auseinandersetzt.

Jeder, der einem Vogel oder Flugzeug zuschaut, sollte sich fragen, wie es möglich ist die Schwerkraft zu überwinden und durch die Luft zu gleiten. Denn, lässt man einen Körper aus grosser Höhe fallen, so beschleunigt sich dieser, bis die Widerstandskraft gleich gross wie die Gewichtskraft ist. Durch grosse Flächen erzeugt man grössere Widerstandskräfte, was die Fallbeschleunigung verlangsamt. Genau nach diesem Prinzip funktionieren die Fallschirme. Doch dieser Fallschirmgleitflug ist mehr eine verlangsamte Fallbeschleunigung als ein Gleiten.

Abbildung 17

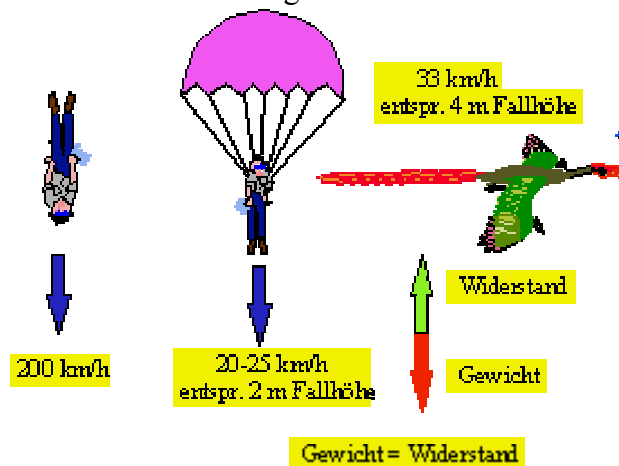
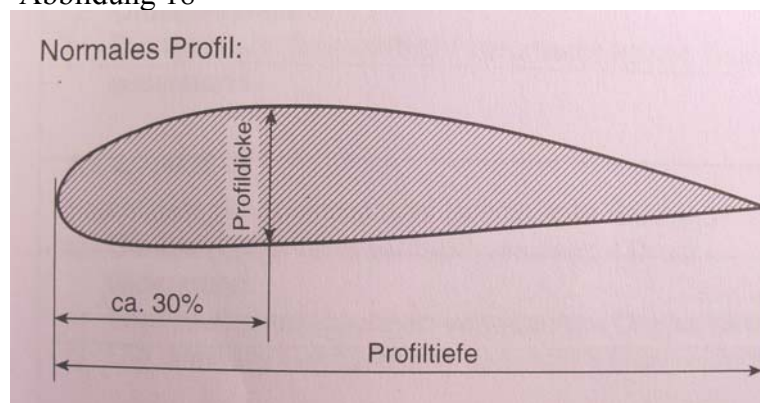


Abbildung von Gleichgewichtszuständen beim Fallen. Die Widerstandskraft ist sowohl beim frei fliegenden Mann als auch beim Fallschirmspringer gleich gross, wie die Gewichtskraft.

Beim echten Gleitflug muss von den Flügeln Auftrieb erzeugt werden. Vögel und Flugzeuge besitzen aus diesem Grund Flügel mit einer ganz bestimmten Querschnittsform, auch Profil genannt.

Abbildung 18



Auf diesem Bild sehen wir ein normales Profil, die max. Profildicke liegt im vorderen Drittel.

Die bewegende Luft (Wind) umströmt, wie das Wasser auch, jeden sich im Medium befindenden Körper, falls dieser nicht die gleiche Relativgeschwindigkeit wie das Medium hat. (Prinzip des Windkanals) Man kann auch sagen, jeder sich in der Luft bewegende Körper wird von dieser umströmt.

2.2 Entstehung des Auftriebs

Bei einem Profil muss sich die Strömung auf der oberen, gewölbten Seite beschleunigen. Denn die Luft muss auf der Flügeloberseite in der gleichen Zeit einen längeren Weg zurücklegen als auf der Unterseite. Damit die Luft von der Oberseite wieder gleichzeitig am Flügelende ankommt, wie die Luft von unten her, muss also die Strömungsgeschwindigkeit auf der Flügeloberseite grösser sein.

Die Bernoullische Gleichung besagt, dass sich der Gesamtdruck (totaler Druck) aus dem statischen Druck (Umgebungsdruck in der ungestörten Atmosphäre, potentielle Energie, also Druck ohne Bewegungsenergie) und dem dynamischen Druck (charakterisiert den Anteil der kinetischen Energie an der Gesamtenergie, also Druck mit Bewegungsenergie) zusammensetzt. Ausserdem nimmt der dynamische Druck im Quadrat zur Geschwindigkeit zu.

Auftrieb entsteht schlussendlich aus dem Druckunterschied zwischen Flügeloberseite und Flügelunterseite.

Erklärung: Auf der oberen Flügeloberseite ist die Strömung schnell, das heisst der dynamische Druck (hohe kinetische Energie) ist gross, demzufolge nimmt der statische Druck ab. Man sagt deshalb, auf der Flügeloberseite herrscht Unterdruck.

Auf der Flügelunterseite ist die Strömung eher langsam, das heisst der dynamische Druck ist klein, demzufolge muss also der statische Druck hoch sein. Man sagt deshalb, auf der Flügelunterseite herrscht Überdruck.

Der Gesamtauftrieb setzt sich aus $\frac{2}{3}$ Unterdruck und $\frac{1}{3}$ Überdruck zusammen. Eigentlich ist es also die Sogwirkung auf der Flügeloberseite, die den Flügel am meisten nach oben zieht und somit die Gewichtskraft ausgleicht. Man kann jedoch auch sagen, der Auftrieb entsteht durch die Ablenkung der Luft am Tragflügel, nach unten.

Lilienthal erklärte den Auftrieb auf eine andere, mir logisch erscheinende und spannende Art:

Die Luft, welche oberhalb der krummlinigen Bahn (Flügeloberseite) vorbeistreicht, wird durch die Zentrifugalkraft eine Sogwirkung auf die Fläche auswirken, indem eine schwache Luftverdünnung eintritt. Die Luft unten wird eine geringe Kompression erfahren, weil die Luftteilchen von unten her gegen die Profilunterseite prallen und sich demnach ein Druck bildet. Luftverdünnung oberhalb und Luftverdickung (Kompression) unten bilden somit den Auftrieb.

Abbildung 19

Abb 2:
Druckverlauf um ein
Tragflügelprofil

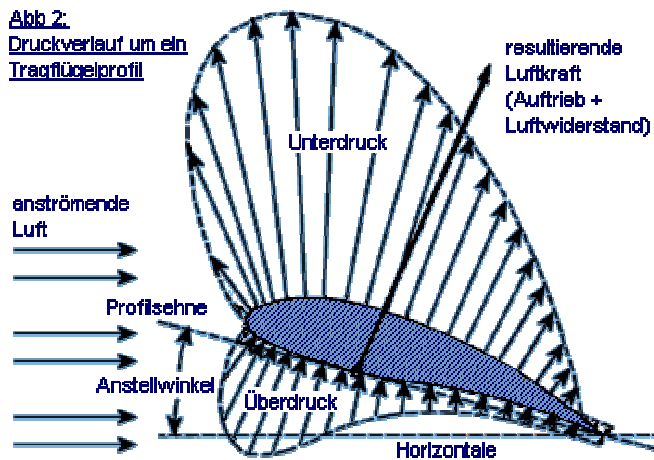
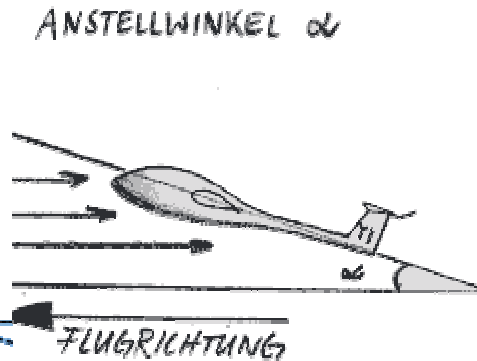


Abbildung 20

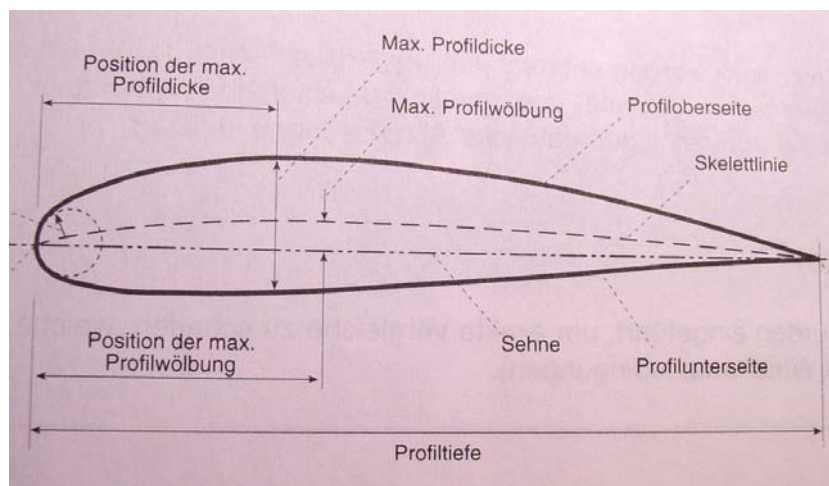


Aus der oberen Abbildung sieht man gut, dass der Auftrieb fast senkrecht zur Anströmrichtung entsteht. Die Sogwirkung auf der Profiloberseite trägt mehr zum Auftrieb bei, als der Unterdruck auf der Flügelunterseite.

Ein wichtiger Punkt ist ausserdem der Begriff Anstellwinkel.

Er ist definiert als der Winkel zwischen dem Flügel, respektiv der Profilsehne (Linie die Eintrittskante und Austrittskante des Flügels verbindet) und der anströmenden Luft. Der Anstellwinkel bezieht sich immer auf die Richtung der Anströmung in der sich das Flugzeug bewegt und der Profilsehne des Flügels.

Abbildung 21



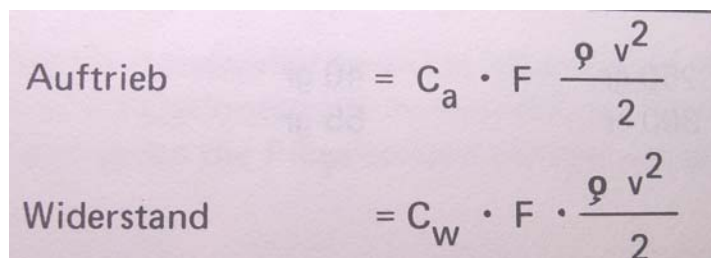
Hier ist eine Beschreibung eines Profils mit den wichtigsten Fachbegriffen abgebildet. Die Profiltiefe ist identisch mit dem Begriff Flügelbreite. Wichtig für die Aerodynamik und die Eigenschaften eines Profils sind vor allem die Position und der Betrag der maximalen Profilwölbung. Je stärker ein Profil gewölbt ist, desto mehr muss sich die Strömung auf der Profiloberseite beeilen, desto grösser wird der Auftrieb und leider meist auch der Widerstand.

2.3 Doch wie erzeugen wir möglichst viel Auftrieb?

Der Zusammenhang ist folgender: Je schneller wir fliegen, desto mehr Luft kann pro Zeiteinheit abgelenkt werden, desto grösser ist demzufolge der Auftrieb oder je grösser die Flügelfläche oder Spannweite (Länge der beiden Flügel, miteinbezogen der Rumpfteil zwischen den Flügeln) des Tragflügels, desto mehr Luft wird pro Zeiteinheit erfasst und nach unten abgelenkt. Auch die Profilform spielt eine Zentrale Rolle, so erzeugen zum Beispiel stark gewölbte Profile, wie sie vor allem langsam fliegende Flugzeuge und Vögel benutzen, relativ viel Auftrieb. Für schnell fliegende Flugzeuge und Vögel empfiehlt es sich, nicht zu starke Profilwölbungen zu benutzen, denn diese erzeugen bei hohen Fluggeschwindigkeiten zu viel Widerstand. Wenn sie das nächste Mal an eine Flugschau gehen, achten sie sich auf den Unterschied der Profilvorderkante und der Profilwölbung eines Jet und eines langsam fliegenden Transportflugzeugs, wie etwa die eines "Pilatusporters".

Schlussendlich spielt dann auch noch die Flughöhe eine Rolle, denn auf 5500m ist die Luft nur noch halb so dicht, dass heisst, es muss doppelt so schnell geflogen werden oder die Luft muss doppelt so stark nach unten abgelenkt werden, um die gleiche Auftriebskraft zu erzeugen.

Die Allgemeine Auftriebsformel lautet:



The image shows two handwritten formulas on a light background. The first formula is for lift (Auftrieb) and the second is for drag (Widerstand). Both formulas use the same variables: C_a or C_w for the coefficient, F for the area factor, ρ for air density, and v for velocity.

$$\text{Auftrieb} = C_a \cdot F \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

$$\text{Widerstand} = C_w \cdot F \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

Wobei bedeutet:

F ist der Flächenfaktor, er beschreibt die grösste Querschnittsfläche senkrecht zur Strömungsrichtung und wird in Quadratmetern angegeben.

v ist die relative Luftgeschwindigkeit gegenüber dem Körper in m/s

klein ρ beschreibt die Luftdichte in Kilogramm pro Kubikmeter, sie beträgt 1.225 kg pro Kubikmeter

C_a und C_w sind Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte, die im Windkanal ermittelt werden.

Man teilt dazu die gemessene Auftriebs und Widerstandskraft durch den oben sichtbaren Bruch multipliziert mit F und bekommt somit ihren Betrag.

2.4 Die drei Vogel oder Flugzeugachsen

Alle Flugzeugachsen verlaufen durch den Schwerpunkt, das heisst, die Drehungen um die Achsen erfolgen durch den Schwerpunkt.

Abbildung 22

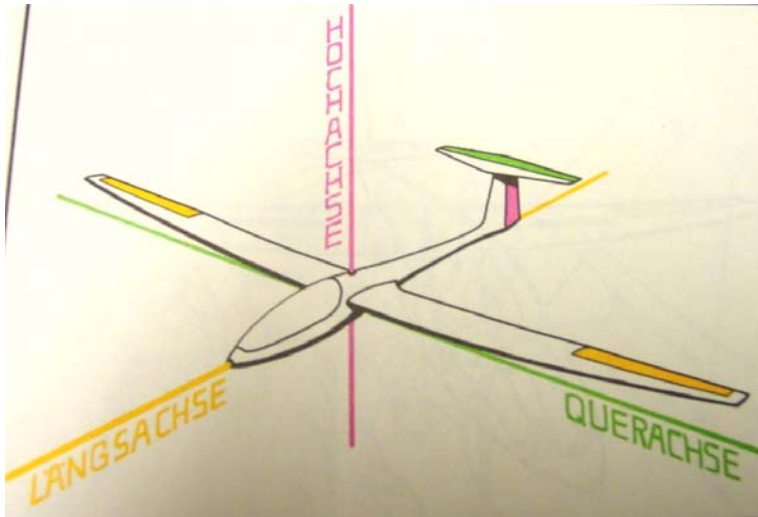


Bild der drei Flugzeugachsen.

Die Längsachse, auch X-Achse genannt, verläuft entlang des Rumpfes.

Steuerung: mittels Querruderausschlag beim Flugzeug oder dem Verdrehen der Vogelflügel im Hinterkantenbereich

Zweck: um eine Kurve zu fliegen, um den Querneigungswinkel zu ändern, was eine Auftriebsdifferenz zwischen den Tragflächen erzeugt

Beispiel Linkskurve: Das rechte Querruder schlägt nach unten aus, die Profilwölbung wird grösser, es entsteht mehr Auftrieb, gleichzeitig schlägt jedoch das linke Querruder nach oben aus, was die Profilwölbung und somit den Auftrieb verringert. Daraus resultiert dann eine Bewegung um die Flugzeuglängsachse, die wir Rollen nennen.

Die Querachse, auch Y-Achse genannt, verläuft horizontal, jedoch senkrecht zum Rumpf

Steuerung: mit Höhenruder beim Flugzeug und Schwanzfedern beim Vogel

Zweck: Anstellwinkeländerung, Auftriebsbestimmung oder Fluggeschwindigkeitsbestimmung z.B. beim Start : zieht man am Steuerknüppel, so schlägt das Höhensteuer nach oben aus, was eine Kraft nach unten bewirkt, das Flugzeugheck senkt sich demnach und die Flugzeugnase und die Tragfläche heben sich, der Anstellwinkel wird somit grösser und der Auftrieb steigt.

Die Hochachse, auch Z-Achse genannt, steht vertikal zur X und Y-Achse und verläuft im Horizontalflug gerade nach unten

Steuerung: mit Seitenruder beim Flugzeug und Schwanzfedern beim Vogel

Zweck: Schieben in Kurven vermeiden, Flugrichtung bestimmen

z.B. Ausschlag mit rechtem Fusspedal, Seitensteuer schlägt nach rechts aus und bewirkt eine Kraft nach links, das Heck bewegt sich dann nach links, während sich die Flugzeugnase nach rechts bewegt.

Wie es in der Natur so üblich ist, gibt es zu jeder auf einen Körper einwirkenden Kraft, eine ihr entgegengesetzte, gleich grosse Kraft, auf irgend einen anderen Körper.

Schauen wir uns mal an welche Kräftegleichgewichte in den verschiedenen Fluglagen herrschen müssen:

2.5 Die Kräfte im stationären, unbeschleunigten Horizontalflug, auch Reiseflug oder Geradeausflug genannt

Bei dieser geradlinigen, gleichförmigen Bewegung sind alle äusseren Kräfte im Gleichgewicht.

$F_{\text{Auftrieb}} = F_{\text{Gewicht}}$ und $F_{\text{Widerstand}} = F_{\text{Schub}}$

Vielfach verwendet man in der Aerodynamik Resultierende Kräfte, man kann deshalb auch sagen, die Resultierende aus Auftriebs und Widerstandskraft, muss gleich der Resultierenden zwischen Gewicht und Schubkraft sein.

Abbildung 23

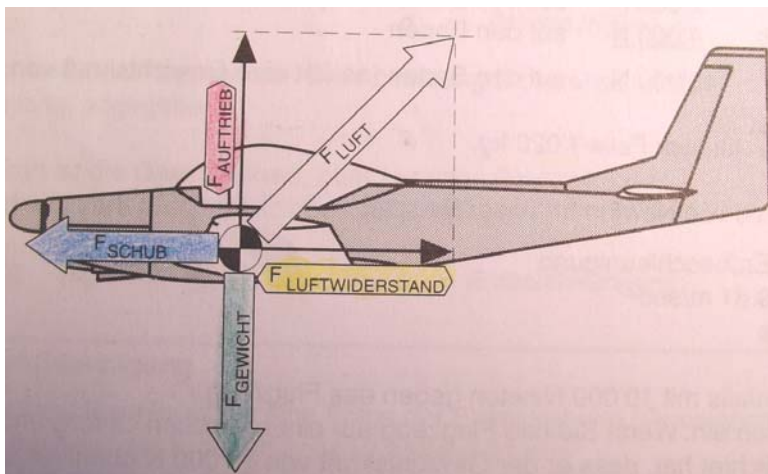


Bild vom Kräftegleichgewicht im horizontalen unbeschleunigten Geradeausflug.

Ein Unterschied zwischen den Vögeln und Flugzeugen ist, beim Vogel wird der Vortrieb und Auftrieb gleichzeitig mit den sich auf und abschlagenen Flügeln erzeugt, beim Motorflugzeug sorgt der Propeller für Schub und die angeströmten Flügel für Auftrieb.

Eigentlich funktioniert ein Propeller ähnlich wie ein Flügelprofil, seine Blätter drehen in vertikaler Richtung, sie werden deshalb auch vertikal von der Luft angeströmt und nur schwach von Vorne.

Der Anstellwinkel nimmt gegen Propellermittle zu, denn hier ist die Rotationsgeschwindigkeit geringer, deshalb muss die Luft stärker abgelenkt werden um einen auf das ganze Blatt gut verteilten Schub zu erzeugen.

Wie beim Flügel auch, sind die Blätter auf der Oberseite gewölbt, es resultiert deshalb eine Kraft respektive Schub in Richtung der Flugzeuglängsachse.

2.6 Die Kräfte im Steigflug

Hier fliegt der Flugkörper mit konstanter Geschwindigkeit auf einem Flugbahnwinkel nach oben.

Damit der Flugkörper steigt, gilt:

$F_{\text{Schub}} > F_{\text{Widerstand}}$

Der Propeller muss deshalb schneller drehen und die Vögel schneller oder kräftiger mit den Flügeln schlagen.

Abbildung 24

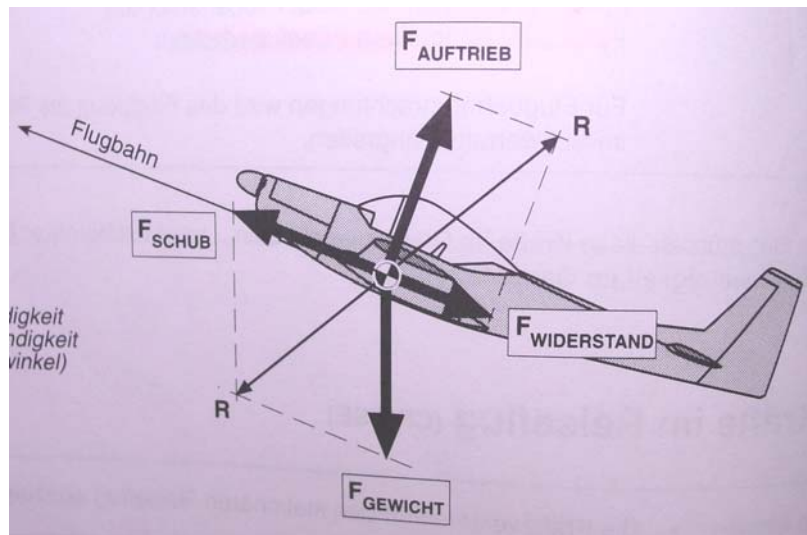


Bild vom Kräftegleichgewicht im Steigflug.

2.7 Die Kräfte im Sinkflug (eigentlich ein Gleiten)

Für diesen Sinkflug sind Segelflugzeuge und Meeressegler, wie Möwen und Albatrosse, sehr geeignet, denn der Widerstand (und Auftrieb) wird bei ihnen nicht durch Schub ausgeglichen, sondern durch die Gleitfluglage, das heisst, die Gewichtskraft zieht das Flugzeug nach vorne unten, denn sie bildet immer eine Senkrechte zum Erdmittelpunkt. Es wirkt deshalb beim kopflastigen Flug eine Kraftkomponente nach Vorne. Die Schwerkraft wirkt dann wie eine Kugel, die eine schräge Ebene herunterrollt, in zwei Komponenten. Die eine wirkt als Gegenkraft zum Widerstand, die andere bildet die Gegenkomponente zum Auftrieb. Es hebt sich also die Luftkraftresultierende und der Auftrieb auf. Die Energie zur Aufrechterhaltung dieses Gleichgewichtes liefert der Sinkvorgang.

Abbildung 25

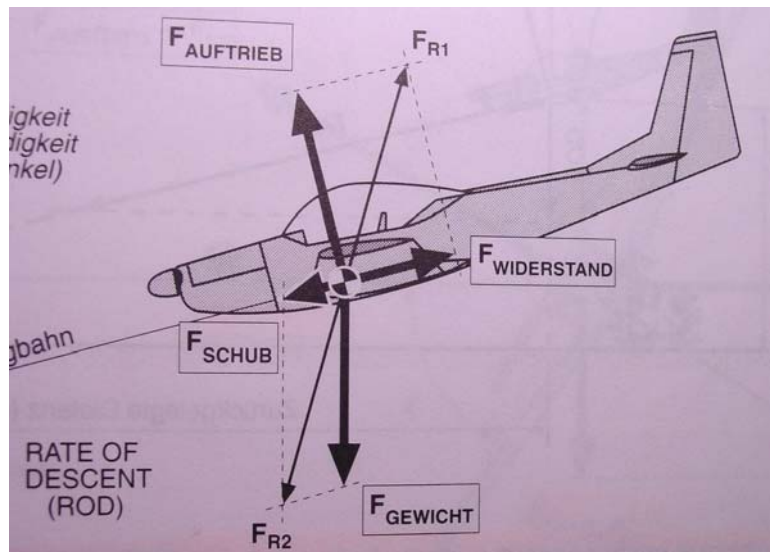


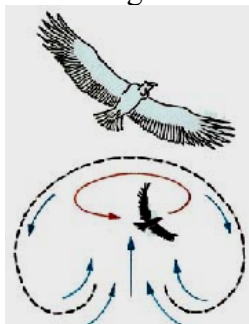
Abbildung vom Kräftegleichgewicht im Sinkflug.

2.8 Die Gleitzahl

Die „Güte“ eines Segelfluggkörpers wird mit der Gleitzahl beschrieben. Die Gleitzahl wird ausgerechnet in dem man die zurückgelegte Strecke durch den Höhenverlust teilt oder die Auftriebskraft durch die Widerstandskraft.

Beispiel: Ein Segler verliert auf 1km Strecke 100m Höhe, dass heisst er besitzt demnach die Gleitzahl 10. Für 10 km zurückgelegte Strecke verliert er also 1/10 Höhe, also 1000m. Je höher also die Gleitzahl, desto besser die Güte des Seglers, desto grössere Distanzen können aus gegebener Höhe zurückgelegt werden. Für Segelflugzeuge und Albatrosse ist die Gleitzahl sehr wichtig, denn sie müssen schnell Gleiten können um zwischen den Aufwinden oder bei sinkenden Verhältnissen nicht allzu viel Höhe zu verlieren. Durch ihre hohen Gleitzahlen können die Albatrosse Kilometerweit im Gleitflug dahinschweben, ohne auch nur einmal mit den Flügeln schlagen zu müssen.

Abbildung 26



Thermik ist warme aufsteigende Luft, sie entsteht durch unterschiedliche Erwärmung der Luft auf Oberflächen. Sand und Kiesgruben erwärmen sich stärker als die Luft auf einem Feld. Die Luft strömt deshalb vom Feld zur Kiesgrube, erwärmt sich dort und steigt, deshalb gibt es wie ein Vakuum, das wieder neue Luft hinterher zieht. In diesen Warmluftschläuchen kreisen dann die Segler um Höhe zu gewinnen, sie steigen mit der wärmeren leichten Luft in den Himmel empor bis die Thermik plötzlich nachlässt oder die Wolke in die Quere kommt.

2.9 Die Kräfte im Kurvenflug

In einer koordinierten Kurve fliegt der Flugkörper mit einer konstanten Fluggeschwindigkeit um eine vertikale Drehachse. Zusätzlich zur Gewichtskraft, die nach unten wirkt, kommt noch die Zentrifugalkraft, die nach aussen des Kurvenradiuses wirkt, dazu. Dass heisst, die Resultierende vom Auftrieb, muss gleich der Resultierenden zwischen Gewicht und Zentrifugalkraft sein.

Man sagt dieser Resultierenden zwischen Gewicht und Zentrifugalkraft auch Scheinlot. Beim Kurvenflug muss deshalb mit grösserem Anstellwinkel (Luft wird stärker abgelenkt, deshalb wird mehr Auftrieb erzeugt) oder mit einer höheren Fluggeschwindigkeit geflogen werden, um der Wirkung der Zentrifugalkraft entgegenzuhalten. Ist eine der beiden Kräfte grösser, so schiebt oder schmiert der Flugkörper.

Abbildung 27

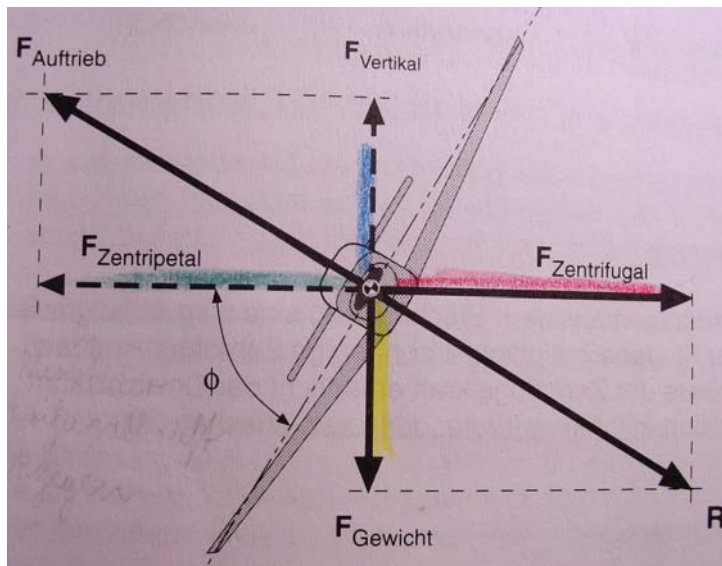
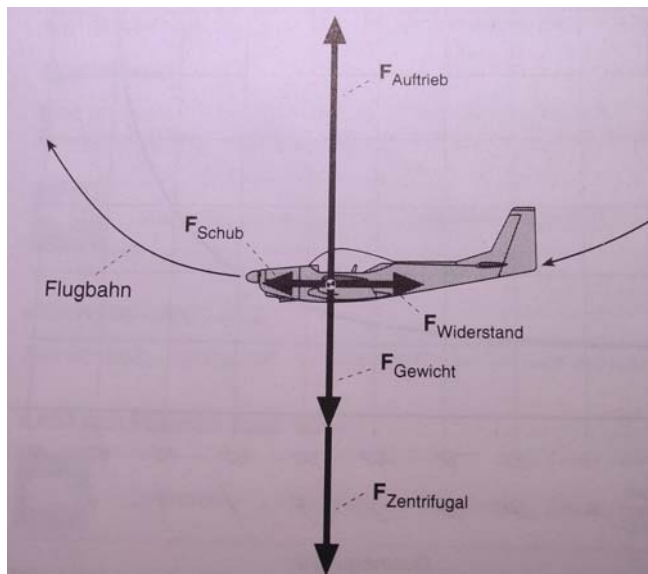


Abbildung vom Kräftegleichgewicht im Kurvenflug.

Auch beim Abfangen aus dem Stechflug kommt die Zentrifugalkraft dazu, sie addiert sich zur Gewichtskraft, deshalb muss beim Abfangen am Steuerknüppel gezogen werden um den Anstellwinkel zu vergrössern. (Der Auftrieb muss grösser werden!) Daraus ist auch ersichtlich, dass Flugzeuge und Vögel, die enge und steile Kurven fliegen wollen, ein Profil besitzen sollten, dass möglichst viel Auftrieb erzeugt. Gerade für Segler ist dies wichtig, da Segler oft sehr langsame und enge Kurven fliegen müssen, um die teils schmalen Thermikschläuche effektiv ausnützen zu können.

Abbildung 28



Kräfte beim Abfangen aus dem Stechflug.

Wie wir nun sehen, bewirkt eine Änderung des Kräftegleichgewichts eine Beschleunigung in Richtung der resultierenden Kraft und somit eine Veränderung der Flugbahn und der Geschwindigkeit. Man sieht schnell ein, dass alle Einwirkungen von aussen, wie Böen und Thermikblasen oder Steuerauslässe vom Piloten innen, Auswirkungen auf die Stabilität um eine oder mehrere der drei Achsen und, letztendlich auf das gesamte Gleichgewicht der Kräfte haben.

Für Pilot und Vogel gilt es, mittels Steuerflächen das gewünschte Kräftegleichgewicht herzustellen und ungewünschte Effekte auszugleichen. Doch eine Voraussetzung eines Flugzeuges ist die Stabilität, ohne sie wären die Piloten und Modellflieger ständig überlastet.

2.10 Probleme zwischen Stabilität und Steuerbarkeit

Auch hier wieder müssen bei einer Flugzeugkonstruktion Kompromisse eingegangen werden, denn ein stabiles und gutmütiges Flugzeug, dass nach einer Störung wieder selbständig in die ursprüngliche Gleichgewichtslage zurückkehrt, ist zwar angenehmer und einfacher zu Fliegen, produziert aber auch mehr Widerstand. Es braucht somit mehr Energie und besitzt schlechtere Flugleistungen. Der Trend im heutigen Flugzeugbau ist Flugzeuge zu entwickeln, die mittels Computersystemen und Sensoren um mehrere Achsen künstlich stabilisiert sind um keine Leistung zu verlieren. Genau nach diesem Prinzip fliegen die Vögel, man sagt dem, indifferentes Gleichgewicht. Man bezeichnet einen Körper dann als indifferent, wenn er nach einer Störung in der Lage bleibt, in die er durch die Störung gebracht wurde. Seine potentielle Energie ändert sich nie, der Schwerpunkt wird weder gehoben noch gesenkt. Man denke einfach an eine horizontale Ebene mit einer Kugel drauf, gibt man dieser einen Stoss, so bleibt sie nach einer gewissen Zeit irgendwo im indifferenten Gleichgewicht liegen.

Abbildung 29

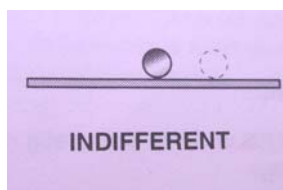


Abbildung von einer Kugel auf einer Ebene.

Die Vögel besitzen immer ein indifferentes Gleichgewicht, die Fluglage, die als Folge eines Steuerimpulses eingenommen wird, wird dann beibehalten. Weitere Steuerimpulse sind wieder erforderlich, damit die eingenommene Fluglage verändert werden kann. Ein solches Fliegen im indifferenten Gleichgewicht benötigt ein schnelles und leistungsfähiges Datenverarbeitungs- und Kontrollsystem, wie ein Vogelhirn oder Computer.

Vorteile beim Fliegen im indifferenten Gleichgewicht:

- schnelle Veränderungen der Fluglage sind möglich
- schnelle Änderung der Fluggeschwindigkeit und Flugbahn
- hohe Dynamik im Flug
- man kann sich neuen Flugsituationen schnell, präzise und mit geringstem Energieverbrauch anpassen

Wichtig für die Tiere ist dies natürlich beim Beuteschlag und der Gefahrenabwehr!

2.11 Wie entsteht eigentlich Luftwiderstand?

Jeder, der gerne schnell mit dem Velo fährt oder die Hand aus dem fahrenden Auto streckt, merkt, dass auf ihn eine Kraft wirkt. Besonders deutlich bemerkt man den Luftwiderstand, wenn man mit dem Velo gegen den Wind fährt, man muss nämlich ziemlich in die Pedale treten um vorwärts zu kommen, denn jetzt addiert sich zum Fahrtwind noch der Gegenwind. Der Widerstand hängt also nur von der relativen Bewegung der Luft gegenüber dem Körper ab, deshalb kann man Messungen im Windkanal machen, denn es kommt nicht drauf an, ob ein Körper mittels einem Motor mit einer bestimmten Geschwindigkeit angeströmt wird oder sich selbst mit dieser Geschwindigkeit bewegt.

Ausserdem ist es für Ingenieure und Aerodynamiker bequemer Versuche an Modellen zu testen, die Ergebnisse sind dann besser auswertbar und die Testpiloten werden erst eingesetzt, wenn das Flugzeug schon relativ optimiert und sicher ist.

Abbildung 30



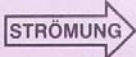
Flugmodell im Windkanal.

Kommen wir noch mal aufs Beispiel mit dem Velofahrer zurück, instinktiv versucht er die Angriffsfläche seines Körpers zu verringern um besser vorwärts zu kommen. Somit haben wir schon ein Gesetz: Der Luftwiderstand steht in direktem Verhältnis zu der grössten Querschnittsfläche, die senkrecht zur Strömung steht. Das heisst, eine doppelt so grosse Querschnittsfläche, die senkrecht zur Anströmung steht, verursacht auch den doppelten Widerstand.

Sicher bemerkt man auch den grossen Unterschied der Kraft, wenn man die Hand bei 60km/h und dann auf der Autobahn bei 120 km/h herausstreckt, die Kraft hat sich dabei vervierfacht. Die Widerstandskraft verändert sich nämlich im Quadrat der Geschwindigkeit. Auch die Luftdichte steht in direktem Zusammenhang mit dem Luftwiderstand. Halbe Luftdichte heisst auch halber Widerstand. Nicht zuletzt spielt dann auch noch die Form eine zentrale Rolle für den Luftwiderstand.

Tabelle mit verschiedenen Formen und ihren Widerstandsbeiwerten:

Abbildung 31

Körperform	STRÖMUNG 	C_w
Scheibe		1.11
Halbkugel		1.33
Halbkugel		0.35
Kugel		0.15 bis 0.45
Ellipsoid		0.2 bis 0.4
Stromlinienkörper		0.1 bis 0.2

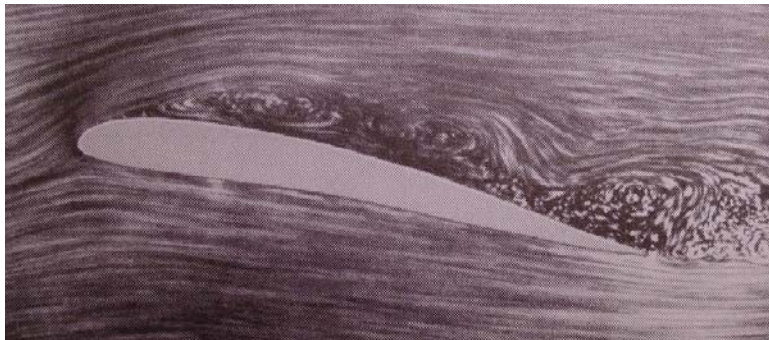
* (C_w bedeutet, Widerstandsbeiwert des Körpers)

Aus dieser Tabelle wird schnell ersichtlich, dass durch eine geeignete Form der Widerstand erheblich verringert werden kann. Man sieht zum Beispiel, dass ein Stromlinienkörper nur 1/12 vom Luftwiderstand verursacht, wie eine Scheibe von gleichem Querschnitt. Extrem aerodynamische Körper, wie etwa ein Flügelprofil, können sogar 1/25 des Luftwiderstandes einer Platte verursachen. Die Formgebung ist beim Fliegen deshalb sehr wichtig, weil man sich in der Luft doch relativ schnell bewegt und der Widerstand eben im Quadrat zur Geschwindigkeit zunimmt. Der aerodynamisch und förmlich schlechteste Körper ist die Halbkugel, die gegen die Strömung gerichtet ist. Weil sie so viel Widerstand verursacht, wird diese Form beim Windmesser (Anemometer) verwendet.

2.12 Doch wie lässt sich dieser grosse Luftwiderstandsunterschied der verschiedenen Körper erklären?

Nun, wie es im Wasser, das in der Aare über einen Stein fliesst zu Verwirbelungen kommt, so geschieht das auch von einem in der Luft umströmten Körper. All diese Verwirbelungen kosten dem System Energie und sollten möglichst vermieden werden.

Abbildung 32



Strömungsbild an einem Flügelprofil.

Je nach Körperform wird der Strömungsverlauf gestört und es bilden sich Wirbel, doch durch eine geeignete Form lassen sich diese Verwirbelungen um ein Vielfaches reduzieren. Nicht nur die Form ist eben ausschlaggebend, auch der Reibungswiderstand ist von Bedeutung, denn seine Grösse wird von der Strömung an der Oberfläche des Körpers verursacht. Reibungswiderstände entstehen überall dort, wo sich zwei Stoffe mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aneinander vorbeibewegen.

Um den Zusammenhang zu sehen, schauen wir uns nun die Strömung an einem Profil an:

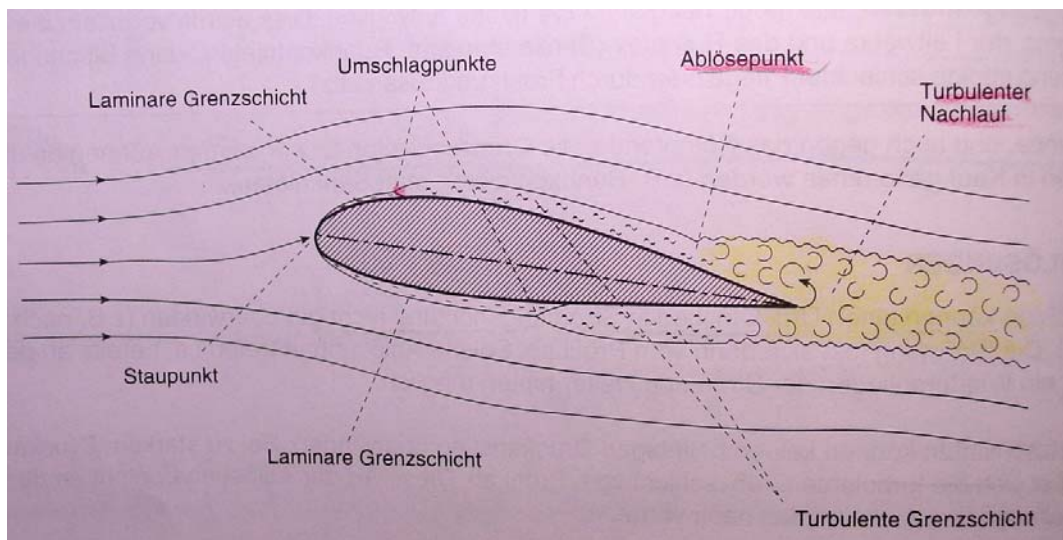


Abbildung 33 Beschreibung des Strömungsbildes an einem Flügelprofil.

Die Strömungsgeschwindigkeit reduziert sich in der Grenzschicht des Flügels(dies ist eine sehr dünne Luftschicht auf der Plattenoberfläche) auf Null. Denn die Luftteilchen haften dort an der Plattenoberfläche, oder anders gesagt, es werden in Folge der Reibung immer mehr Strömungsteilchen abgebremst. Mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche steigt die Geschwindigkeit rasch auf die ungestörte Anströmgeschwindigkeit an.

Das Gebiet mit dem starken Geschwindigkeitsabfall nennen wir von nun an Grenzschicht. Da wir so grosse Geschwindigkeitsunterschiede in dieser dünnen Grenzschicht haben, spielt die Reibung eine starke Rolle.

Gewünscht ist es diese Grenzschicht, speziell der Bereich wo die Geschwindigkeit null ist, möglichst dünn zu halten, weil dort bewegen sich die Teilchen in einer Strömung mit Reibung und die Gesetze von Bernoulli gelten nur in reibungsloser Strömung. Gewünscht ist ja ein grosser dynamischer Druck auf der Profiloberseite, beziehungsweise möglichst viel Auftrieb.

Man unterscheidet eigentlich zwei Arten von Grenzschichten. Bei der laminaren Grenzschicht, die hauchdünn ist, das heisst nur einige Zehntel Millimeter, fliessen die Luftteilchen schichtartig und in Strömungsrichtung parallel übereinander hinweg.

Bei der turbulenten Grenzschicht werden die unterschiedlich schnellen Luftteilchen durch Wirbelbildung untereinander vermischt. Durch die Wirbelbildung ist diese Schicht deshalb auch dicker als die laminare und der Widerstand ist viel grösser. Bei jedem Flügel wird natürlich eine laminare Grenzschicht angestrebt, doch diese laminare Strömung kann nicht beliebig lang und dick werden. Ab einer bestimmten Dicke und Länge schlägt diese Strömung einfach in eine turbulente Grenzschicht um und es kommt zu Verwirbelungen. Diesen Bereich, wo die Strömung umschlägt, nennen wir Übergangsbereich.

Nach der turbulenten Grenzschicht, folgt dann der Ablösepunkt und nach diesem verläuft die Strömung ohne Auftrieb zu erzeugen horizontal nach hinten. Diesen Bereich nennen wir die turbulente Strömung.

Je schneller man fliegt, desto kürzer wird die laminare Grenzschicht. Es ist deshalb sehr wichtig, dass die Oberfläche von Tragflächen absolut glatt und sauber ist. Speziell die Segelflugzeuge und schnell fliegenden Flugzeuge sind sehr empfindlich auf Schmutz im vorderen Bereich des Tragflügels, der Leitwerke und des Rumpfes. Gegen Profildicke ist die Strömung eh schon turbulent, deshalb sind hier Verschmutzungen weniger wichtig. Staubteile, Insektenteile, Rauhreif, Regen und kleinste Rauigkeiten zerstören die laminare Grenzschicht und sorgen dafür, dass die Strömung schneller umschlägt und zu einer turbulenten Strömung wird.

Im Fliegen merkt man das bei den guten Leistungssegelfliegern sehr gut. Als ich mal in eine Regenwolke kam, bin ich sicherheitshalber etwa 20km/h schneller geflogen um den gleichen Auftrieb zu erzielen, denn die Strömung reisst viel schneller ab, es muss schneller geflogen werden um den gleichen Auftrieb zu erzeugen und, man sinkt fast so gut, wie mit leicht bis mittel ausgefahrenen Bremsklappen.

Vögel besitzen Federn, die sich den Bedingungen extrem gut anpassen können und weniger heikel sind. Übrigens besitzen sie eine extrem interessante Oberfläche mit einer bestimmten räumlichen rauen Struktur, die wie die Haifischhaut den Reibungswiderstand verringert.

Auch ein wichtiger Aspekt ist, dass der Reibungswiderstand von dem Anstellwinkel abhängt, denn mit zunehmendem Anstellwinkel nimmt der Auftrieb, jedoch leider auch der Widerstand, zu.

Doch zu gross darf man den Anstellwinkel nicht werden lassen, denn beim kritischen Anstellwinkel reisst die Strömung dann ab, das heisst, die Luft kann der Profiloberfläche auf Grund der zu grossen Wölbung nicht mehr folgen.

Am hinteren Teil des Profils verringert sich das Soggebiet deshalb drastisch und am vorderen Profilbereich bildet sich ein starkes Soggebiet, auf der Profilunterseite wird der Überdruck immer stärker. Doch der Druckunterschied wird immer geringer, somit gibt es fast kein Auftrieb mehr. Diesem Zustand sagen die Flieger Stall, beachtet man den kritischen Anstellwinkel nicht, so kommt es zu einem abrupten Zusammenbruch des Auftriebes.

Die Steuerbarkeit und die Stabilität des Flugzeuges gehen dabei weitgehend verloren, das Flugzeug kippt ab. Der gleiche Effekt tritt auf, wenn man die Mindestgeschwindigkeit* unterschreitet. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass die meisten tödlich endenden Flugunfälle beim Kreisen in geringer Höhe passieren. Viele Piloten vergessen im Stress oder wenn sie den Flugplatz nicht gut kennen und mit anderem beschäftigt sind, dass sie beim Kreisen genügend schnell fliegen müssen um genügend Auftrieb zu erzeugen, denn zur Gewichtskraft addiert sich im Kurvenflug ja noch die Zentrifugalkraft. Um nicht zuviel Höhe zu verlieren ziehen einige Piloten einfach am Steuerknüppel und vergrössern somit den Anstellwinkel. Es kommt dann leider oft vor, dass beim langsamen Fliegen in Kurven mit grossem Anstellwinkel, plötzlich die Strömung am äusseren Flügel abreisst und der Pilot mit seiner Maschine ungespitzt die Erde erreicht.

*(Geschwindigkeit, bei der das Flugzeug gerade noch steuerbar ist)

Zum Schluss möchte ich noch zwei Widerstände vorstellen:

2.13 Der Interferenzwiderstand

Der Interferenzwiderstand entsteht durch die gegenseitige Beeinflussung, der von verschiedenen Flugzeugteilen ausgelösten Verwirbelungen, in der Strömung.

z.B. beeinflusst eine Hand, die man aus dem Fensterchen eines Flugzeuges streckt, den Strömungsverlauf auf der Tragfläche und gar auf dem Höhenleitwerk, denn die Verwirbelungen von der Hand, die schon alleine Widerstand verursachen, treffen auf die Tragfläche, wo sie die laminare Strömung stören, was wieder zusätzlichen Widerstand verursacht usw.

Der Gesamtwiderstand eines Flugzeuges oder Vogels, ist deshalb stets grösser, als die Summe der Widerstände der Einzelteile.

2.14 Der induzierte Widerstand (Randwiderstand)

Weil dieser Widerstand bei meinem letzten Beispiel noch eine zentrale Rolle spielen wird, finde ich es wichtig, seine Entstehungsart genau anzuschauen.

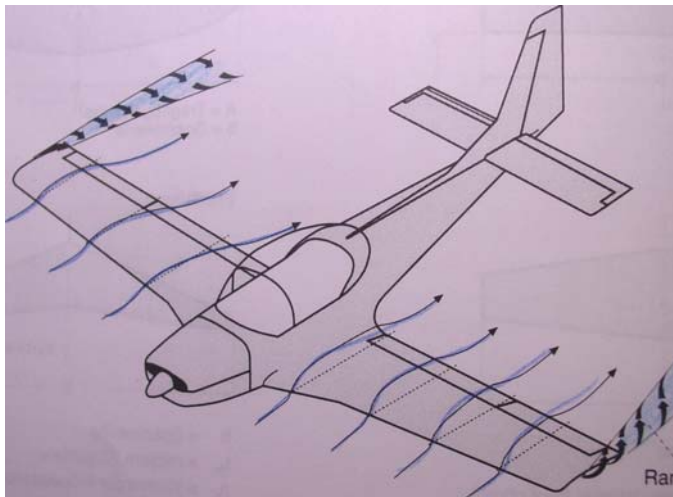
Dieser induzierte Widerstand ist von der Druckdifferenz zwischen Flügelober- und Unterseite abhängig. Er entsteht an Flügeln, genauer an den Flächenenden, durch den Druckausgleich zwischen dem Unterdruck auf ProfiOberseite und dem Überdruck auf der Profilunterseite. Auch der Abwind hinter der Tragfläche spielt für seine Grösse eine wichtige Rolle, denn der induzierte Luftwiderstand wird umso grösser, je stärker die vom Tragflügel erfasste Luftmenge abgelenkt wird.

Es ist ja irgendwie logisch, dass dieser Druckunterschied irgendwo wieder ausgeglichen werden muss. Der induzierte Widerstand gleicht einem Wirbelzopf (Anfahrwirbel), der ständig neu erzeugt wird.

Die Wirbelzöpfe drehen sich stets nach innen, weil die Luft von der Tragflächenunterseite schräg nach aussen um den Randbogen (Kante ganz aussen am Flügel) nach oben fließen möchte. Die von den Wirbelzöpfen absorbierte Energie geht dem Auftrieb verloren. Der Auftrieb wird deshalb gegen die Flügelspitzen hin immer kleiner.

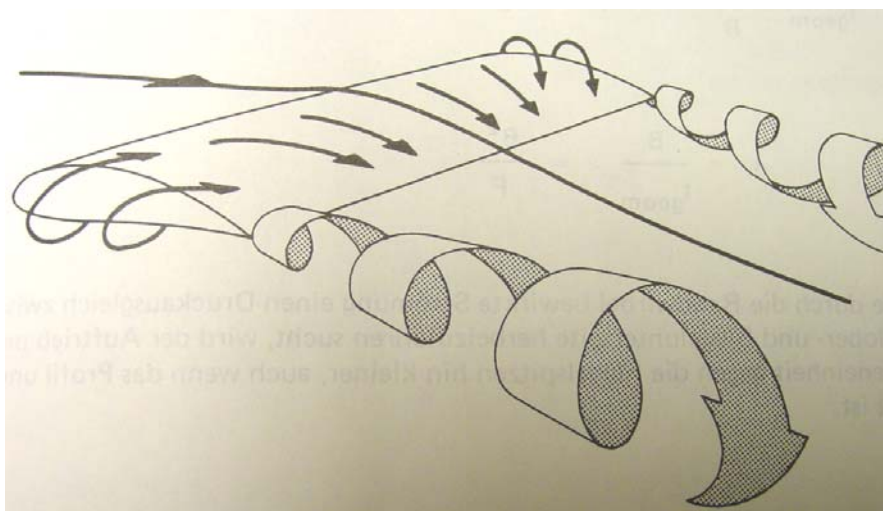
Auf dieser Abbildung kann man sehr gut sehen, dass der Strömungsverlauf in der Flügelmitte noch parallel zur Vorwärtsbewegung verläuft. Auf der Unterseite werden die Stromlinien immer mehr aus der Mitte weggezogen, je weiter wir uns von ihr entfernen. Auf der Oberseite, von den Flügelspitzen weg, ist der Strömungsverlauf gegen die Mitte gerichtet und wird mit zunehmender Annäherung gegen die Mitte parallel zur Bewegungsrichtung. Diese Querströmungen in Spannweitenrichtung verursachen eine elliptische Auftriebsverteilung, denn der Strömungsverlauf um das Profil, wird auf Grund dieser Randwirbel gegen die Flügelspitzen hin, wie angezogen und somit gestört.

Abbildung 34



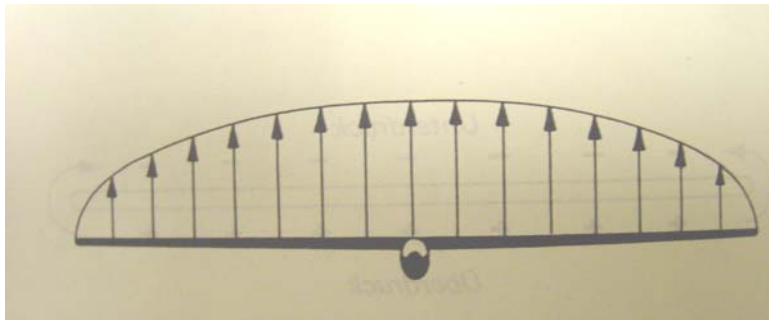
Hier sieht man den Strömungsverlauf auf der Tragflächenoberseite, der gegen die Randwirbel abgelenkt wird

Abbildung 35



Bei dieser Abbildung ist der Verlauf der Querströmung noch besser sichtbar.

Abbildung 36



Hier sieht man die elliptische Auftriebsverteilung an einem Flugzeug, der Auftrieb nimmt in Richtung der Flügelenden kontinuierlich ab

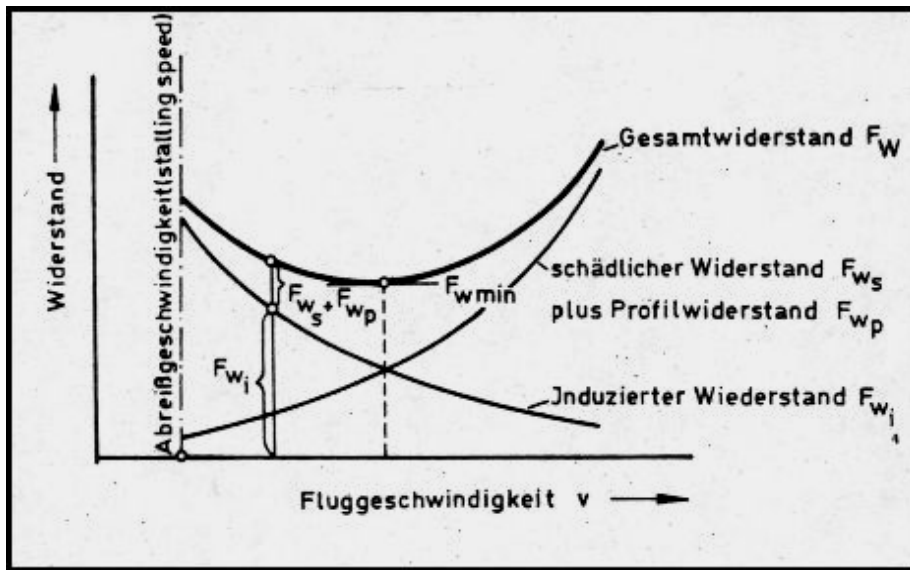
2.15 Einflüsse auf den induzierten Widerstand

- Auftriebserzeugung: Je mehr Auftrieb ein Flugzeug erzeugt, desto grösser wird das Druckgefälle zwischen Ober- und Unterseite des Flügels. Bei Starts, Landungen und Kurvenflug, wo viel Auftrieb benötigt wird und man mit grossem Anstellwinkel fliegt, ist der induzierte Widerstand besonders gross.
- Flughöhe: Der induzierte Luftwiderstand nimmt mit Abnahme der Luftdichte zu, weil man dort mit grösserem Anstellwinkel fliegen muss (Luft wird stärker abgelenkt) um den gleichen Auftrieb zu erzeugen.
- Flugmasse: Je höher die Masse, desto grösser die Gewichtskraft, demzufolge muss auch die Auftriebskraft grösser werden.
- Streckung(Verhältnis von Spannweite zur Flügelbreite) Je länger die Flügel, desto mehr Luft wird pro Zeiteinheit erfasst, desto weniger muss die Luft abgelenkt werden. Je kürzer der Flügel, desto stärker muss die Luft abgelenkt werden, um die gleiche Auftriebskraft zu erzielen, desto grösser der induzierte Widerstand.
- Winglets und Flügeltanks verringern den induzierten Widerstand.
- Fluggeschwindigkeit: Mit zunehmender Fluggeschwindigkeit nimmt der induzierte Widerstand annähernd im Quadrat zur Geschwindigkeit ab und im Quadrat bei abnehmender Geschwindigkeit zu.

Erklärung:

Es handelt sich nicht um den normalen Widerstand, der im Quadrat zur Geschwindigkeit steigt, sondern es geht immer darum, wie stark die Luft abgelenkt werden muss. Fliegt man schnell, so wird eine grosse Luftmenge pro Zeiteinheit erfasst, die nur geringfügig abgelenkt werden muss, um den nötigen Auftrieb zu erzielen.

Grafik 37



Bei dieser Grafik wird deutlich, dass der induzierte Widerstand vor allem beim Langsamflug von grosser Bedeutung ist. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt sein Anteil am Gesamtwiderstand im Quadrat ab, dafür steigt der schädliche Widerstand (Luftwiderstand und Interferenzwiderstand) im Quadrat zur Geschwindigkeit stark an.

Wie dieser induzierte Widerstand im Tierreich und mit technischen Neuentwicklungen verringert wird, und welche Gefahr er verursacht, sehen wir im nächsten Teil meiner Arbeit.

Teil 3: Der Vogelflug in Bezug zur Technik

3.1 Über die Funktionsweise des Flügelschlages, auch Schlagflug genannt.

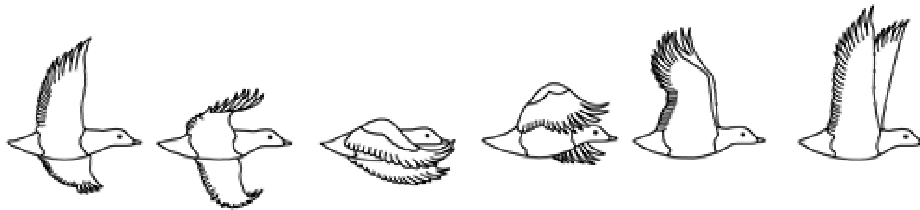
Der Flügelschlag ist eine extrem komplexe und dynamische Bewegung, wie erwähnt, geht es darum, gleichzeitig Vortrieb und Auftrieb zu erzeugen.

Diese Bewegung setzt sich im Wesentlichen aus drei Teilen zusammen:

- 1.- dem Schlagen der Flügel, darunter versteht man die auf und abwärts Bewegung
- 2.- dem Drehen oder Verwinden , darunter versteht man das Verdrehen der Flügel oder die unterschiedliche Anstellwinkeländerung
- 3.- dem Schwenken, darunter versteht man das Zurückziehen oder Vorziehen des Flügels

3.2 Zum Bewegungsablauf des Flügelschlages

Abbildung 38



Der Bewegungsablauf selbst besteht aus Auf- und Abschlag. Beim Aufschlag geht es darum, den Flügel möglichst widerstandsarm und kraftlos entgegen der Flugrichtung nach oben hinten zu führen. Weil der Flügel eine Bewegung entgegen der Flugrichtung ausführt, ist der Weganteil beim Aufschlag geringer als beim Abschlag. Um die Gewichtskraft der Flügel auszugleichen, wird zu Beginn des Aufschlages der Anstellwinkel vergrößert, was zu erhöhtem Auftrieb führt. Gleichzeitig sind die Vögel darin interessiert, den Widerstand und Kraftverbrauch möglichst gering zu halten, deshalb weichen beim Aufschlag die Handschwingen auseinander und die Federn im Flügelbereich werden luftdurchlässig gemacht, sie sind dabei nicht so schön zusammen wie beim Abschlag. Manche Vögel knicken und falten die Flügel ein bisschen um den Widerstand zusätzlich noch zu verringern. Kurz bevor die Flügel oben hinten ankommen, wird der Anstellwinkel wieder verkleinert.

Abbildung 39



Abbildung 40



Abbildung 41



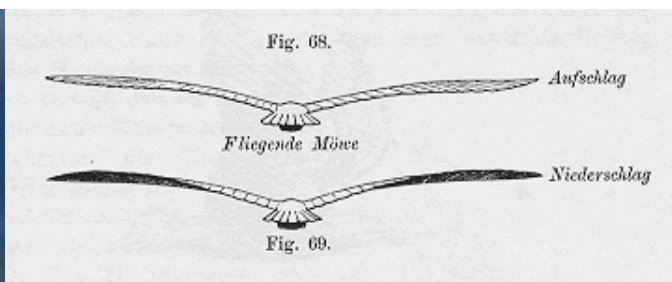
Hier sieht man drei Bilder von Vögeln, die eine Aufschlagbewegung ausführen. Beim Adler, Bild ganz rechts, sieht man deutlich, wie seine Handfittiche gespreizt und dadurch luftdurchlässig gemacht werden. Auf der Computeranimation des linken Bildes mit dem Kanarienvogel sieht man, wie die Flügel nach hinten oben versetzt sind und wie der Anstellwinkel beim Flügelvorderbereich (Eintrittskante) langsam wieder negativ wird.

Am Höchstpunkt setzt der Abschlag ein. Mit den starken Brustmuskeln des Vogels, die etwa 15% des Vogelgewichtes ausmachen, werden die Flügel, speziell die Handschwingen, gegen die Flugrichtung nach unten geführt. Dabei liegen die Handschwingen flach aneinander und bilden eine glatte Fläche, auch die Federn im Flügelbereich sind nun zusammen. Wobei zu sagen ist, dass der Flügel verwunden (verdreht) ist und zwar so, dass der Handschwingenbereich einen viel negativeren Anstellwinkel gegenüber der Luft hat als der Armbereich. Die Flügel werden beim Abschlag nicht nur von vorne angeströmt, sondern durch die Abwärtsbewegung werden sie ausserdem vertikal in Bewegungsrichtung, also von unten her, angeströmt. Die Handschwingen, die stärker nach unten geneigt sind und auf Grund des Hebelarmes schneller angeströmt werden, spüren diese vertikale Anströmung am stärksten. Sie funktionieren wie Propeller, die sich in vertikaler Bewegung zur Anströmrichtung nach unten bewegen. Durch diese Bewegung werden sie vertikal von unten angeströmt und die gewölbte Form der Handschwingen, verursacht nach dem Propeller-Prinzip, den Schub.

Abbildung 42



Abbildung 43



Wirklich gute Bilder über den Abschlag fand ich nicht, doch im rechten Bild bemerkt man, dass beim Abschlag der Anstellwinkel an den Flügelenden viel negativer, also nach unten geneigt ist, als beim Aufschlag, wo die Flügelenden eher eine positive Anstellung aufweisen. Der Flügelbereich nahe dem Arm weist einen nahezu konstanten Anstellwinkel beim Auf- und Niederschlag auf.

Zusammenfassend kann man sagen, dass während des Aufschlages und Abschlages Auftrieb erzeugt wird, weil sich der Anstellwinkel im Armbereich nur wenig ändert. Der Armbereich wird wie ein Flügelprofil dauernd von vorne angeströmt und sorgt für den nötigen Auftrieb. Deshalb fliegen die Vögel auch keine grossen Parabeln, sondern der Kopf bleibt beim Geradeausflug immer auf gleicher Höhe. Einzig der Rücken geht beim Abschlag ein bisschen nach oben und beim Aufschlag leicht nach unten.

Dies kommt daher, weil der Aufschlag kürzer dauert, ausserdem geht die relative Fluggeschwindigkeit beim Aufschlag zurück, weil kein Schub erzeugt wird und ein anderer Aspekt ist, dass beim Aufschlag die Rücken- und Brustmuskulatur geringer beansprucht wird als beim Abschlag. Der Schub hingegen wird nur beim Abschlag, durch die Abwärtsbewegung der negativ angestellten Handschwingen, erzeugt.

Abbildung 44



Ein Bild von Gänsen im Formationsflug, man sieht, wie der Kopf immer gerade bleibt und die Füsse strömungsgünstig versteckt werden.

3.3 Anpassungsfähigkeit und Anforderungen an die Vogelflügel, um das komplexe Fliegen eines Vogels auszuführen:

Die Schlagbewegung alleine ist zwar schon verblüffend, doch Vogelflügel müssen ja nicht nur im Stande sein horizontal zu fliegen, sondern sie müssen für das jeweilige Tier eine enorm vielfältige Anforderungspalette erfüllen. Die Anpassungsfähigkeiten eines Vogelflügels auf verschiedene Flugsituationen, wie schnelle Flugmanöver, energiesparender Gleitflug, Starts und Landung, sind enorm. Natürlich gibt es auch im Tierreich Spezialisierungen, wie die schon erwähnten Unterschiede zwischen einem Albatros und einem Adler oder Mäusebussard. Doch trotzdem ist jeder Vogelflügel für viele verschiedene Flugzustände optimierbar und nicht, wie eine Flugzeugtragfläche, die nur für einen bestimmten Flugzustand ausgelegt ist. Der Vogelflügel vermag sein Flügelprofil an die ständig ändernden Strömungsverhältnisse anzupassen, die Wölbung des Profils kann gesteuert werden. Weil die Vogelprofile keine starren Gebilde sind, sondern sich die Krümmung der Fluggeschwindigkeit und Situation anpasst, sagt man ihnen elastische Profile.

Wenn man überlegt, wie z.B. schnelle Flieger wie der Mäusebussard, der Sturzflüge mit mehr als 100km/h ausführen kann und dann noch so sanft und langsam zu landen vermag, so ist man schon fasziniert von diesen gegensätzlichen Begabungen und dieser Vielfältigkeit. Nicht selten beobachtet man Bussarde auf Feldern, die Punktlandungen auf Pfählen von weniger als 6cm Durchmesser machen. Ich habe mich oft gefragt, wie solch schnelle Flieger trotzdem so langsam und gut Landen können. Denn jedes schnelle Flugzeug, hat normalerweise auch eine hohe Landegeschwindigkeit, wenn es nicht mit speziellen Landeklappen ausgerüstet ist.

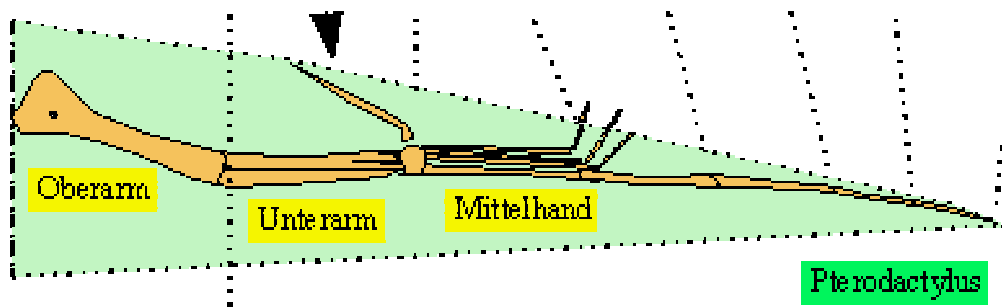
Trotz den technischen Hilfsmitteln, wie beispielsweise:

- Wölbe- und Landeklappen(diese vergrössern die Flügelwölbung und erzeugen erhöhten Auftrieb, darum kann langsamer geflogen werden)
- Vorflügel(wie ein zusätzliches zweites kleines Profil auf der Flügeloberseite, das Energie von der Tragflächenunterseite zur Oberseite leitet, dadurch reisst die Strömung weniger schnell ab, es kann deshalb mit grösseren Anstellwinkeln geflogen werden)
- Bremsklappen (diese stören den Strömungsverlauf auf Flügeloberseite und erhöhen die Widerstandskraft)
- Bremsfallschirm.(zur radikalen Abbremsung von Jets, enorme Widerstandserzeugung)

All diese Massnahmen zur Reduzierung der Lande- und Startstrecke und Verbesserung der Langsamflugeigenschaften sind nichts, gegen die Möglichkeiten eines Vogelflügels. Schaut man das ganze Federkleid an und die Knochen eines Flügels, die ja im Grunde ähnlich wie ein Menschenarm aufgebaut sind, sich jedoch im Verlaufe der Evolution auf das Fliegen spezialisiert haben, so ist man plötzlich über solche Flugleistungen gar nicht mehr so erstaunt.

Man kann sich das in etwa so vorstellen, die Hand eines Vogels besteht noch aus 3 kurzen und einem langen Finger, an diesen sind die Handschwinge und anderen Federn angebracht. Ihre Aufgabe ist es, den Flügel im Aussenbereich(Handbereich) der jeweiligen Situation entsprechend zu strecken, verwinden und drehen(Anstellwinkel ändern). Der Daumen hingegen schaut nach links, er hat sich sozusagen zu einem beweglichen Vorflügel entwickelt. Der Oberarm ist stark verstärkt, doch Elle und Speiche sind fast gleich geblieben.

Abbildung 45



Auf diesem Bild, sieht man den nach links gebogenen Daumen, die drei kurzen und den langen Finger, sowie den dicken starken Oberarmknochen.

Über das ganze Flügel skelett verstreut, formen die Federn, die aus der toten Substanz Kreatin bestehen, den glatten Flügel.

Abbildung 46

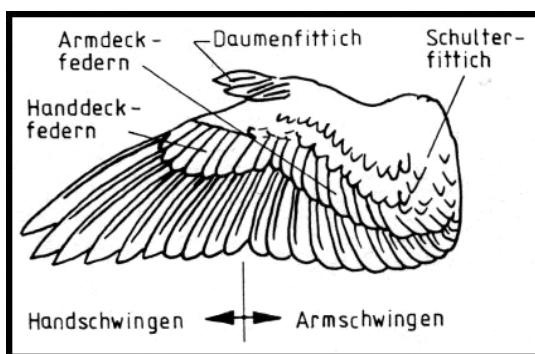
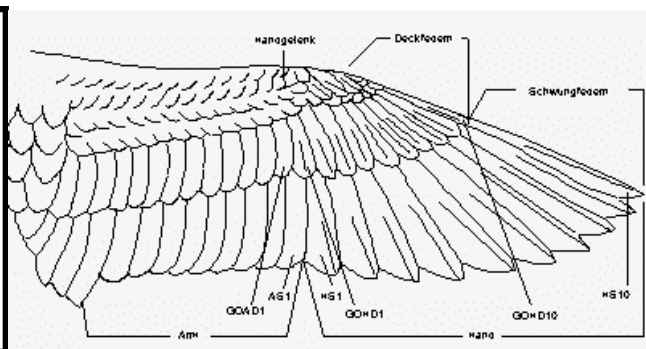


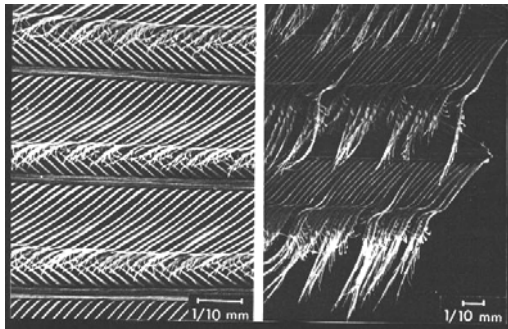
Abbildung 47



Links sieht man den Aufbau eines Vogelflügels mit seinem Federkleid und den Fittichen. Auf der rechten Abbildung sind die verschiedenen Federarten auf der Flügeloberseite abgebildet.

Die Federn können im Handbereich bewegt werden und sind elastisch aufgebaut. Eine einzige Feder besteht aus zirka 500 Ästen zu 500 Strahlen. Sie hat unter dem Mikroskop eine Form aus Hacken und Bögen, die ineinander greifen. Dadurch ist es möglich, dass sie ein Vogel durch den Schnabel ziehen kann und die Risse in der Feder werden nach dem Reisschlussprinzip geschlossen. Ausserdem wachsen diese Federn, wie unsere Nägel, nach.

Abbildung 48



Feinaufbau der Federstruktur
unter dem Mikroskop.

Was ich mit dem Ganzen eigentlich sagen will, ist, dass diese Elastizität und teilweise Steuerbarkeit der Federn sowie das Skelett und das Muskelsystem diese Flugeigenschaften hervorrufen, die den Vogel zu einem Luftakrobaten machen.

z.B. Eine interessante Eigenschaft eines Vogelflügels ist, dass er Anstellwinkel und Profilwölbungen einnehmen kann, wo man normalerweise sagen müsste, die Strömung reisst ab. Man hat aber herausgefunden, dass die elastischen Federn im Flug zum Schwingen angeregt werden, was die laminare Grenzschicht länger aufrechterhält.

Wird die laminare Grenzschicht dann doch turbulent und es bilden sich langsam Verwirbelungen, so kommt der zweite Trick. Die Deckfedern stellen sich bei einem lokalen Strömungsabriss auf, was dazu führt, dass Luft von der Unterseite des Flügels auf die Oberseite strömt und diesen Ablöseblasen wieder Strömungsenergie zugeführt wird. Dadurch werden diese Ablöseblasen und Verwirbelungen wieder unschädlich gemacht und die Strömung beruhigt sich wieder und fliesst wieder der Wölbung entlang, anstatt abzureissen. Die Deckfedern wirken somit als Rückstrombremsen, die ein Abreissen der Strömung im Hinterkantenbereich praktisch verunmöglichen, was den Widerstand und Auftrieb erhöht.

Doch damit nicht genug, ein Vogel kann seine Flügel nach oben, unten, vorn, hinten verstellen, seine Flügelfläche durch falten, knicken oder zusammenziehen verringern (Zweck: bessere Gleitflugeigenschaften beim Schnellflug, denn auf Grund der geringeren Flügelfläche muss schneller geflogen werden um den gleichen Auftrieb zu erzielen, gleichzeitig hat man aber auch weniger Fläche, so, dass der Widerstand, der ja im Quadrat zur Geschwindigkeit zunimmt, nicht unverhältnismässig ansteigt), den Anstellwinkel beliebig verändern und somit die Geschwindigkeit und den Auftrieb steuern, die Flügel verwinden, die Flügel zusammenklappen, z.B. beim Sturzflug, den Schwanz in zwei Richtungen bewegen usw.

All diese Massnahmen sind beliebig kombinier- und anwendbar. Dadurch ergibt sich eine unheimliche Anpassungsfähigkeit an verschiedene Flugsituationen und die unterschiedlichen Anforderungen können gemeistert werden.

3.4 Voraussetzungen für diese Agilität und Besonderheit des Vogelfluges sind:

- ein hochempfindliches System von Sensoren und Stellgliedern, welches den gesamten Vogelkörper umfasst
- ein enorm leichtes und stabiles Vogelskelett
- einen ausgeklügelten Bewegungsapparat bestehend aus Muskeln und Sehnen
- einen guten Energievorrat für das energieaufwändige Fliegen
- ein gutes Lungensystem, enorme Speicherung von Sauerstoff in Muskel und Gewebe mittels Luftsäcken
- ein Zentralnervensystem, das fähig ist die vielen Sinneseindrücke und Reize sinnvoll zu registrieren, verarbeiten und deuten sowie die komplexen Bewegungsabläufe zu steuern
- eine enorm gutes Navigations- und Orientierungsvermögen sowie Erinnerungsvermögen, um die langen Flugruten zu meistern und einzuprägen
- ein ausgeklügeltes Federkleid, das die anpassungsfähige Tragfläche bildet
- Handfittiche zur Reduzierung des induzierten Widerstandes
- ein Daumenfittich, bestehend aus kleinen Federn die am Daumen verankert sind, . beim Langsamflug und Landen erlaubt der Daumenfittich grössere Anstellwinkel, ohne, dass die Strömung abreisst

3.5 Meine Meinung über die Bedeutung und Zukunft von Flugzeugen mit schlagenden Flügeln

Ich glaube, grundsätzlich wissen wir jetzt, wie und weshalb ein Vogel fliegt. Ich hoffe, es ist auch klar geworden, dass der Vogelflug extrem vielfältig und schwierig ist. Vom Vogelflug allein ist noch längst nicht alles bekannt, immer wieder stossen Wissenschaftler auf neue Besonderheiten, Rätsel und Entdeckungen. Die Ingenieure, Techniker und Bioniker, versuchen krampfhaft, vereinfachte Verbesserungen an Luftfahrzeugen nach dem Vorbild der Natur zu gewinnen. Häufig jedoch, werden Verbesserungen an Flugzeugen durch Zufall oder Einfall herausgefunden, erst später stellt man fest, dass der Vogel diese Probleme in ähnlicher, einfacher und genialer Weise schon längst gemeistert hat.

In meinen Recherchen bin ich auf Leute gestossen, die mit grossem rechnerischen, technischen und praktischen Aufwand versuchen, den Schlagflug nachzuahmen. Ja, es gibt sogar eine Ornithoptervereinigung im Internet.

Ornithopter sind Flugmodelle oder Flugzeuge, die mit den Flügeln schlagen um Vortrieb zu erzeugen.

Ein deutscher „Düftler“ und Ingenieur ist seit zehn Jahren daran, seine Freizeit dem Ornithopterbau zu widmen. Immer wieder verbessert er seine Flugmodelle, sucht andere gutmütigere Profile, will die optimale Antriebsart herausfinden und beschäftigt sich mit der Suche nach den geeigneten Materialien. Im Internet erklärt Horst Rübiger auf mehr als 150 Seiten sein Hobby, jedoch auf eine sehr komplizierte und mathematische Art.

In diesen 10 Jahren ist es ihm jedoch noch nie gelungen, ein Schlagflügelmodell zu konstruieren, das in der Praxis mehr als 40 Sekunden lang geflogen ist. Auch das Fliegen einer Kurve und ein Steigen im Flug konnte er nicht in die Realität umsetzen. Immer wieder fiel etwas auseinander, klemmte irgendetwas, wurde das Modell instabil, kippte ab, geriet in einen unkontrollierbaren Zustand oder es erzeugte zuwenig Schub und Auftrieb.

Abbildung 49



Hier ein Bild seines Modellfliegers, in einer kurzen Phase des Glücks. Das Flugzeug fliegt im Geradeausflug mit geringem Höhenverlust dem Boden entgegen. Man sieht schön die Abfolge der Flügelausschläge: Mittelstellung, die Flügel sind kurz horizontal, dann folgt der Aufschlag, Mittelstellung beim Abschlagen, der volle Ausschlag nach unten beim Abschlagen.

Zufälligerweise bin ich auf einer amerikanischen Webseite auf ein Forscherteam gestossen, denen es gelungen ist mit einem Schlagflügelmodell mehr als zwei Minuten zu fliegen. Sie konnten sowohl Kurven fliegen als auch Steigflüge ausführen. Auch die Landung verlief einigermassen glimpflich.

Durch die Stärkung des Selbstbewusstseins und die Freude an der technischen Herausforderung, sind sie zur Zeit daran, ein Ornithopterflugzeug zu bauen, dass einen Piloten transportieren soll. Gesponsert durch einige Firmen und auf Grund des öffentlichen Interessens, versucht das Forscherteam und seine Studenten von der „University of Toronto for Aerospace Studies“, die letzte Hürde in der Luftfahrt, dass Fliegen mit den schlagenden Flügeln zu meistern.

Abbildung 50



Abbildung 51



Hier ist die Abbildung dieses monströsen Ornithopters und auf der rechten Seite sieht man das Team, das diesen „Vogel“ entwickelt hat und künftig alles daran setzen wird, ihn flugtauglich zu machen.

Interessierte können eine Testfahrt dieses Ornithopterflugzeuges auf dem Internet, unter www.ornithopter.net, auf Video miterleben. Dazu laden sie von der Webseite, unter Media Gallery, die Videos herunter.

Ich muss sagen, es lohnt sich, denn ein Flugzeug mit schlagenden Flügeln sieht wirklich Furcht einflössend aus, verursacht einen grossen Krach und macht einen sehr instabilen und trägen Eindruck. Leider ist es bis jetzt noch nicht gelungen, damit mehr als zwei Meter vom Boden abzuheben.

Sich mit Schlagflügelmodellen zu befassen, ist heute in etwa noch so brotlos, wie wenn man sich im 17Jh. mit dem Fliegen beschäftigt hätte. Wie gesagt, grosse Entwicklungen geschehen erst, wenn die Wirtschaft erkennt, dass mit einer Neuentwicklung oder Idee Geld zu machen ist. Zur Zeit ist die Entwicklung von Ornithoptern mehr für „Freaks“ und Technikfreunde, die Freude am Ausprobieren, Berechnen und Basteln haben.

In ferner Zukunft wüsste ich nicht, wieso unsere Flugzeuge mit den Flügeln schlagen sollten, denn unsere Technik verfügt noch nicht über die wirklich geeigneten, anpassungs- und widerstandsfähigen Materialien, die ein „Schlagflugzeug“ benötigen würde. Auch der geeignete Antriebsmechanismus und die Energiespeicherung ist noch nicht gefunden worden.

Ein Propeller zum Beispiel, arbeitet mit einem Wirkungsgrad von 75-80%, dass heisst, soviel Prozent der Motorkraft wird in Schub umgesetzt. (ein Motor in einem Auto zum Vergleich, setzt nur zwischen 15%- 20% der Verbrennungsenergie in Antriebsenergie um)

Die Antriebsmechanismen eines Ornithopters arbeiten mit sehr geringem Wirkungsgrad. Der Elektromotor arbeitet zwar mit einem Wirkungsgrad von 85%, doch die grossen Reibungswiderstände des komplizierten Schlagflügelantriebs, das hohe Gewicht vom Akku, der ja nicht alle Ladungsenergie, die ihm zugeführt wird, effektiv umsetzen kann, führen schlussendlich zu einem sehr schlechten Gesamtwirkungsgrad.

Später vielleicht, wäre es einmal möglich, als Energiequelle Brennstoffzellen zu verwenden, doch diese sind heute noch viel zu schwer.

Technisch gesehen könnte man vielleicht schon ein kostenintensives Flugzeug mit einfachen, schlagenden Flügeln und geringen Leistungen sowie hohem Energieverbrauch entwickeln, doch dies bringt nicht unbedingt einen Nutzen, sondern stellt mehr eine Herausforderung dar. Wahrscheinlich wäre es auch ungeheuer teuer im Unterhalt und sensibel auf Störungen des Gleichgewichts oder Fehler im Computersystem. Man fragt sich auch, wie man mit einem solchen Flugzeug überhaupt Landen könnte. Wahrscheinlich müsste man die Flügelstellung in der Mittelstellung blockieren und im Gleitflug, wie ein Segelflugzeug, landen.

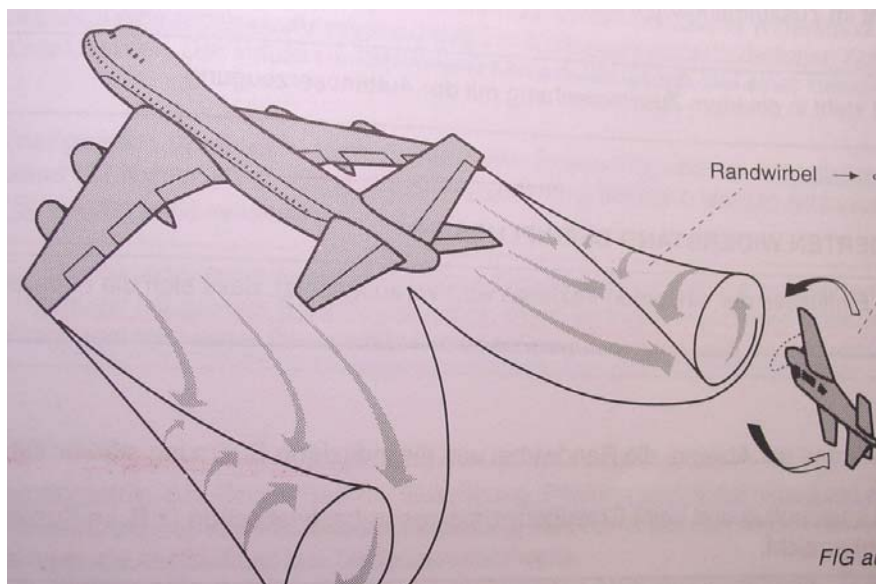
Ich glaube, es ist wichtiger, dass wir versuchen kleine Details an Flugzeugen zu verbessern, die effektiv einen Vorteil bringen, anstatt ein Flugzeug mit schlagenden Flügeln konstruieren zu wollen, wenn es noch nicht einmal gelungen ist, einen Roboter zu konstruieren, der annäherungsweise so gut aufrecht gehen kann und über einen Gleichgewichtssinn verfügt, wie wir Menschen.

3.6 Neueste „Detailverbesserung“ am Flugzeug zur Verringerung des induzierten Widerstandes

Zum Schluss möchte ich noch ein schönes aktuelles Beispiel zeigen, wo es gelungen ist, Biologie und Technik zu verbinden, um ein technisches, respektive aerodynamisches Problem nach biologischem Vorbild zu lösen. In der Theorie des induzierten Widerstandes kennen wir uns mittlerweile aus, wir wissen, dass vor allem grosse und schwere Flugzeuge mit stark gewölbten Profilen oder relativ kleinen Tragflächen(hohe Flächenbelastung) und geringer Fluggeschwindigkeit, sehr grosse Wirbelschleppen, respektiv induzierten Widerstand verursachen.

Der induzierte Widerstand vermindert nicht nur stark den Auftrieb, sondern hinter grossen startenden oder landenden Flugzeugen, wie etwa einer Boeing 747 oder einer MD 11, ist es ratsam noch ein Weilchen zu warten, bevor man mit einem kleinen Flugzeug abhebt. Denn die Randwirbel hinter grossen Flugzeugen können bis zu 2 Minuten hinter dem Flugzeug erhalten bleiben. Gerät man mit einem mittleren Flugzeug in einen solchen Wirbel, der sich kontinuierlich ausbreitet bis er seine Stärke verliert, so kann das Flugzeug unkontrolliert hinunter- oder hinaufgeschleudert oder horizontal gedreht werden. Diese Tatsache bedingt deshalb eine angepasste Start- und Landetechnik auf einem Flugplatz.

Abbildung 52



Hier sieht man den Abwind sowie die grossen Randwirbel, die sich hinter dem Passagierflugzeug ausbreiten. Rechts hat ein kleines Flugzeug das Vergnügen unfreiwillig eine Rolle auszuführen.

Abbildung 53

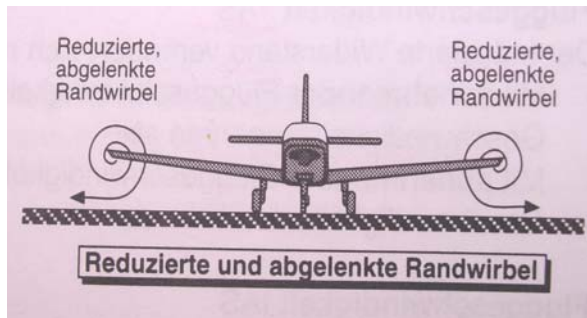
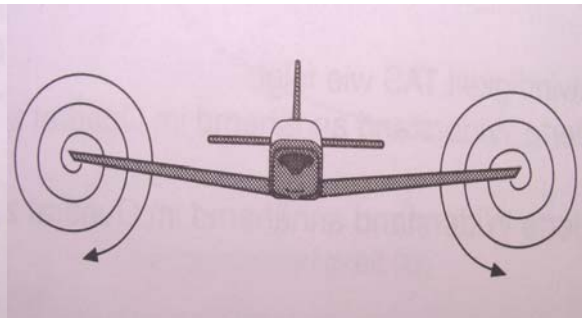


Abbildung 54



Auf diesen zweiten Abbildungen sehen wir „den Bodeneffekt“. Dieser verursacht, dass das Flugzeug auf zwei bis vier Metern über Boden noch lange schwebt. Beim Landen werden sich die Randwirbel am Boden abtossend. Kurz bevor ein Grossflugzeug am Boden aufsetzt, sollten sie einmal beobachten, wie Dreck, Blätter und Rauch auf der Piste nach aussen herumgewirbelt werden.

Da dieser induzierte Widerstand und seine Randwirbel eigentlich nichts als Nachteile mit sich bringt, gilt es ihn möglichst zu vermeiden. In der Praxis ist es gängig, den induzierten Widerstand durch Erhöhung der Flügelstreckung oder einer besonderen Gestaltung des Randbogens zu minimieren.

Bei Hochleistungsseglern, die viel in der Thermik kreisen und eher langsam fliegen, macht sich dieser Widerstand besonders stark bemerkbar. Sie haben deshalb sehr lange und schmale Flügel, wie sie auch die Albatrosse und Möwen besitzen. Ihre Flügellänge kann 18mal grösser sein als die Flügelbreite, man sagt in der Fliegersprache, die Flügelstreckung beträgt 18.

Abbildung 55



Abbildung 56



Hier sieht man zwei starke Segler mit langen, schmalen Flügeln. Links ist ein Segelflugzeug (DG-505) mit einem kleinen Hilfsmotor abgebildet und rechts der grösste und beste Langstreckensegler der Vögel, der Albatross. Durch geschicktes Ausnutzen der Windscherungen, das sind höhenabhängige Unterschiede der Windgeschwindigkeit auf dem Meer, kann er hunderte von Kilometern ohne einen Flügelschlag auskommen. Auch Segelflugzeugprofis sind aus gegebener Höhe, ohne Motor, bis zu 1600km weit geflogen, wenn die Thermikbedingungen und der Hangaufwind optimal gewesen sind.

Ein Problem bei so langen und schmalen Flügeln ist sicherlich die Stabilität. Sie müssen genügend fest und steif gebaut sein und dürfen beim Schnellflug nicht zu flattern beginnen, ausserdem benötigt man mit solchen Flügeln auch viel Platz beim Transport und im Hangar.

1976/77 hat ein Amerikaner erstmals die Konstruktion von kleinen Zusatzflügeln am Flügelende vorgeschlagen, diese Winglets, sollten einen Beitrag zur Verringerung der Randwirbel leisten. Der Learjet war eines der ersten Flugzeuge, das mit Winglets herumflog.

Abbildung 57



Hier sieht man abgebildet einen Learjet mit schwarzen Winglets.

Viele Jahre später erforschten Wissenschaftler die Einflüsse von aufgefächerten Flügelenden auf die Grösse des induzierten Widerstandes. Man fand heraus, dass sich der kompakte Randwirbel, durch die Auffächerung an den Flügelenden, in mehrere kleine Wirbelfäden aufspalten lässt.

Abbildung 59

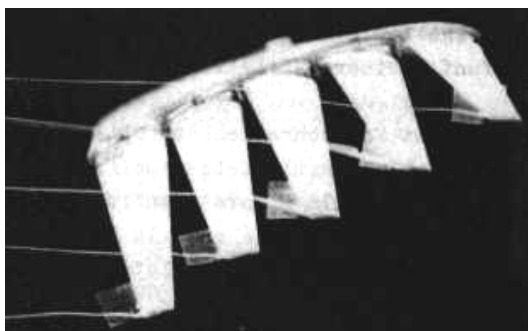
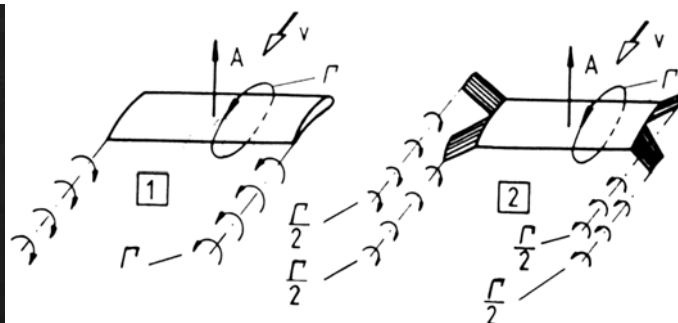
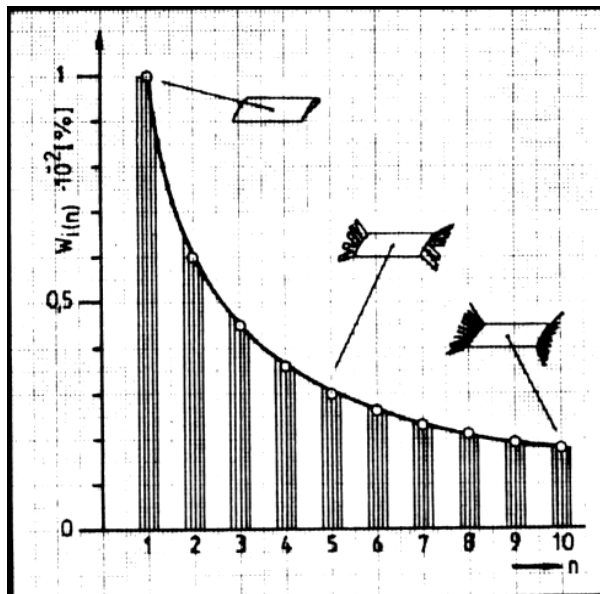


Abbildung 60



Auf diesen Abbildungen sieht man die Aufspaltung der Randwirbel. Auf der rechten Grafik, liest man, dass ein Flügel mit zwei Auffächerungen an den Flügelenden nur noch halb soviel induzierten Widerstand verursacht, wie ein ganz gewöhnlicher Flügel.

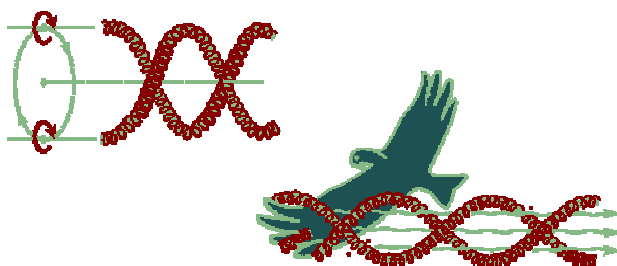
Abbildung 61



Diese Grafik verdeutlicht, wie der induzierte Widerstand durch die zunehmende Auffächerung der Flügelenen abnimmt.

Die Wirbelfäden selbst winden sich spiralförmig umeinander und erfahren somit eine Beschleunigung nach hinten, dadurch wird ein geringerer induzierter Widerstand erzeugt, als der des grossen Einzelrandwirbels. Die Wirbel entstehen durch die Umströmung der Handfittiche, an denen durch Auftrieb oben Sog und unten Druck herrscht. Schon zwei Wirbel verursachen durch ihre Drehfelder eine zusätzliche Rotationsbewegung mit dem Nachbarwirbel. Die Wirbel wirbeln somit stromabwärts umeinander. Diese schraubenförmigen Wirbel, die daraus entstehen, pumpen Strömung durch ihr Inneres. Der Spreizflügel, oder die aufgefächerten Flügelenen, wirken somit als Strömungsbeschleuniger und verringern den induzierten Widerstand.

Abbildung 62



Auf dieser Abbildung sieht man die Wirbel, die an den Handfittichen entstehen und sich zusätzlich im Kreis umeinander wirbeln.

Abbildung 63



Hier sieht man die Vögel in Keilformation fliegen, sie tun dies nicht zum Spass, sondern der jeweils vordere kämpft den Weg durch die Luft frei oder anders gesagt, produziert die Randwirbel. Dem nächsten Vogel dienen die Vorwärts- und Aufwärtskomponenten des induzierten Widerstands an den Flügelenden, zur Ersparung von Muskelarbeit.

In der Natur übernehmen die Handfittiche die Aufgabe dieser Aufspaltung der Randwirbel. Die Auffächerung und Höhenstaffelung der einzelnen Fittiche, die alle eine Wölbung ähnlich einem kleinen Flügelprofil aufweisen, bewirken nebst der Flügelvergrößerung ebenfalls eine Verminderung des induzierten Widerstandes und deshalb ein Mehrge winn an Auftrieb. Gerade für Landsegler und Vögel des Waldes ist diese Art der Widerstandsverring erung günstiger, als die Methode der Vergrößerung der Flügelstreckung, die vor allem Meeressegler anwenden. Dies ist unter anderem der Grund, weshalb man keine Waldvögel sieht, die an den Bäumen kleben.

Abbildung 64



Hier sieht man ein schönes Bild von einem Adler (Landsegler). Speziell auffallend sind seine aufgefächerten Flügelenden respektive seine Handfittiche.

Die Vögel auf dem Land haben meist breite und relativ kurze Flügel mit ausgeprägten Handfittichen, dadurch sind sie wendiger und kommen weniger in Gefahr sich an Gegenständen anzuschlagen und hängen zu bleiben, ausserdem wirken sie weniger tollpatschig und schwerfällig als die grossen Verwandten auf dem Meer.

Diese klappen ihre Flügel häufig zusammen um überhaupt noch watscheln zu können, nicht selten verlieren junge Albatrosse auch das Gleichgewicht oder fallen bei der Landung auf den Schnabel.

Diese gewonnenen Kenntnisse, die man durch das Beobachten und Nachkonstruieren eines Vogelflügels gewinnen konnte, verleiteten die Techniker dazu, Flugzeuge mit aufgefächerten Flügelenden in die Welt zu bringen. Diese aufgefächerten Flügelenden, nennt man Winggrids. In der Schweiz haben Ingenieure ein Motorflugzeug mit aufgefächerten Flügelenden gebaut, dass als Experimentalflugzeug herumfliegen darf.

Abbildung 65



Abbildung 66



Hier auf diesem Bild sieht man das Flugzeug mit seinen kurzen Flügeln und den Winggrid-Elementen an den Flügelenden.

Abbildung 67



Dieses Flugmodell besitzt nur am rechten Flügel ein Winggrid-Element. Auf Grund der Verminderung des induzierten Widerstandes und der Erhöhung des Auftriebs, darf der rechte Flügel viel kürzer sein, als der Linke. Das Flugverhalten dieses Modells, bleibt in etwa gleich, wie bei einem Flugzeug mit zwei normalen Flügeln, wie auf der linken Seite.

Nach neusten Erkenntnissen sollte der Winggrid-Flügel folgende Konstruktionshinweise befolgen:

- Die Größe des Winggrids darf nicht mehr als 50 % der gesamten Spannweite betragen.
- Das Winggrid sollte je nach Flügeltiefe vier oder fünf Einzelflügel haben, die einen Mindestabstand aufweisen müssen.
- Die Montageebene der Winggridflügel, muss eine bestimmte Anstellung gegenüber dem Basisflügel besitzen.
- Die Einzelflügel müssen parallel zueinander montiert sein.
- Das Winggrid muss pro Zentimeter Spannweite den gleichen Auftrieb aufweisen, wie der Basisflügel.

Auch diese Konstruktionshinweise stammen wörtlich aus dem Internet, sie finden sie unter der gleichen Homepage wie unten.

Doch was mich am meisten erstaunt hat, sind die erheblichen Leistungsverbesserungen, die ein mit Winggrid-Flügeln bestücktes Flugzeug erfährt:

- Reduzierung der Spannweite eines Flügels um ca. 50 %, bei gleichen Flugleistungen und Flugeigenschaften
- signifikante Reduzierung des induzierten Widerstandes um ca. 50 %
- gutartiger Strömungsabriss beim max. Auftriebsbeiwert beziehungsweise maximalem Anstellwinkel
- Verminderung, bzw. Wegfall der Querruder – Seitenruderkoordination, aufgrund der Steigerung des Roll-/Schiebemomentes, das Flugzeug wird dadurch einfacher und stabiler zum Fliegen
- geringerer Bauaufwand aufgrund des rechteckigen Flügelgrundrisses
- geringere Strukturgewichte

Diese Angaben zur Leistungsverbesserungen sind wörtlich aus dem Internet zitiert!

Man findet sie unter: www.geier-segelflug.de, dann auf den Link Aerodynamik drücken und dort den Winggridflügel-Text anschauen.

Ich finde das Beispiel von der Neuentwicklung dieser Winggrid-Flügel sehr gut, denn man sieht, dass am Anfang ein aerodynamisches Problem erkannt wurde, danach versuchte man dieses Problem rein technisch zu lösen. Am Schluss hat man jedoch bei der Natur um Rat gesucht, um eine technische Vereinfachung nach natürlichem Vorbild zu entwickeln.

Entstanden ist ein geniales Produkt, dass wahrscheinlich in der Zukunft noch von sich reden lässt und mit grosser Wahrscheinlichkeit Bestandteil neuer Flugzeuge sein wird.

3.7 Schlussgedanken:

Ich denke, dass der neue Wissenschaftsbereich, "die Bionik", zukünftig noch viel zum Fortschritt beitragen wird. Irgendeinmal werden womöglich sogar wir genügend reif sein um Flugzeuge zu konstruieren, die in Sachen Beweglichkeit und Anpassungsfähigkeit viel mit dem Vogelflug gemeinsam haben.

Doch ich bin mir ganz sicher, dass es uns nie gelingen wird, Flugapparate zu bauen, die sich so erhaben, leicht, beweglich, anpassungsfähig und vollkommen durch die Lüfte schwingen, wie die Könige der Luft, unsere Vögel.

Am Anfang meiner Maturaarbeit hätte ich mir nie gedacht, welch ein Wunderwerk ein fliegender Vogel im Grunde ist und wie viel er zur Entwicklung und Verbesserung unserer Flugzeuge und Technik beigetragen hat und künftig wahrscheinlich auch noch wird.

Quellenverzeichnis

Literatur:

<u>Buchtitel:</u>	<u>Autor:</u>	<u>Verlag/Erscheinungsjahr:</u>
Aerodynamik und Flugmechanik *Bundesamt für Zivilluftfahrt	Willy Eichenberger	BAZL* 1974
Erfindungen der Natur	Yves Coineau, Biruta Kreisling	Tesloff 1974
Faszination Segelflug	Rolf Schneider	Motorbuchverlag Stuttgart
Grundlagen des Fluges	Bruno Guggiari, Peter Weichelt	Aero Club der Schweiz 1997
Horizonte Faszination Segelflug	Rolf Schneider	Motorbuchverlag Stuttgart
Pioniere der Aviatik AG Zürich 1972	Carl Hans Pollog, Erich Tilgenkampf	SchweizerVerlagshaus
Sport Fliegen(Die Theorie)	Dieter Maier	Nymphenburger Verlagshandlung 1982
Ausserdem habe ich viele AeroRevue Zeitschriften gelesen, die ich alle zwei Monate zugeschickt bekomme.		
Inhalt: neuste Technik, Flugunfälle, Meisterschaften, neue Flugzeuge usw.		

Quellenverzeichnis(Videos, Internet-Texte):

Internetseiten:

www.geier-segelflug.de
www.aniprop.de
www.lilienthal-museum.de
www.ornithopter.de
www.das-nurfluegelteam.de
www.digitalefolien.de
www.ebel-k.de
 genauer: <http://www.ebel-k.de/Fliegen1/Fliegen2/fliegen2.html>
www.lfm.mw.tum.de
www.kairosundkaos.de
www.bionik.tu-berlin.de
www.nabu.de

DVD:

Das Geheimnis der Zugvögel von Jacques Perrin

Abbildungsverzeichnis:

Die Abbildungen 21,23,24,25,27-30,32,33,34,62,53 und 54 stammen aus dem Buch“ Grundlagen des Fluges“.

Die Abbildungen 22,31,35 und 36 aus dem Buch“ Aerodynamik und Flugmechanik“.

Der Rest der Abbildungen stammt aus dem Internet(Bildsuche bei Google)

Das Photo auf der Titelseite verdanke ich meinem Bruder, der an den Dittinger Flugtagen (Flugschau) photographiert hat.

Es zeigt eine Entenschar, die einem Ultralight-Flugzeug nach fliegt. Die Enten wurden an das Flugzeug von klein an gewöhnt und folgen ihm überall hinterher. Dadurch erhoffen sich Vogelfreunde, dass man den Vögeln künftig, die in Vergessenheit geratenen Nist- und Futterplätze zeigen kann.

Ziel ist es, ihnen den Weg zu schönen Naturreservaten zu weisen, den sie dann später auswendig und allein fliegen müssen.

So nun bin ich am Ende meiner Arbeit angelangt!

Vielen Dank fürs Interesse Thomas Schmid