

## Einleitung



Ein Pilot muß nicht unbedingt die wissenschaftlich genaue Ursache des Fliegens verstehen. Das Verständnis über die physikalischen Ursachen beim Fliegen macht auch nicht unbedingt einen besseren Piloten. Es sind nur wenige Zusammenhänge der Aerodynamik für einen Piloten wichtig. Wenn er Wind und Wetter richtig interpretiert, intuitiv mit der

Luft Eins ist, also versteht und fühlt daß Fliegen im Wesentlichen das Einhalten von Mindestgeschwindigkeit ist, sich jederzeit in einer kontrollieren Fluglage befindet, die Bedienung des Geräts vor allem bei Start und Landung beherrscht und Risiken erkennt und meidet, dann ist er auf dem besten Weg. Segelflieger brauchen zusätzlich ein eingprägtes Modell der vertikalen Bewegungen der Luft um diese nutzen zu können.

### Vorbilder aus der Natur

Es ist anzunehmen, daß Vögel kein tiefes Verständnis der Aerodynamik haben. Auch Erfahrung und Schulung spielen bei ihnen nur eine untergeordnete Rolle. Erstaunlich wie die Prägung und genetische Veranlagung sie in die Lage versetzt den ersten Flug einigermaßen heil zu überstehen. Sie brauchen sich auch keine Gedanken um die Flugstabilität zu machen, die Einrichtungen dazu sind konstruktiv schon festgelegt.



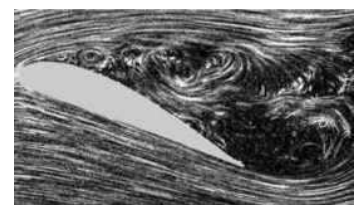
Will der Mensch fliegen, dann benötigt er Hilfsmittel. Er muß in die aerodynamischen Eigenschaften des Geräts vertrauen und sich wenigstens mit der Bedienung vertraut machen. Der nächste Schritt wäre, selbst ein Fluggerät zu bauen und natürlich auch zu fliegen. Auch das geht noch mit geringen Kenntnissen der Aerodynamik wenn man nach bestehenden und geprüften Plänen nachbaut. Selbst

manntragende Flugzeuge können und dürfen ohne Nachweis ausreichender Erkenntnisse der Aerodynamik, Flugstabilität und was noch alles dazugehört, nachgebaut werden - selbst von Nichtfliegern. Ein Regelwerk von Prüfungen und Bauabnahmen gewährleistet beim Nachbau von manntragenden Flugzeugen, daß die Vorgaben des Konstrukteurs eingehalten werden.

Ein Konstrukteur muß nicht nur festigkeitstechnische- sondern auch flugleistungs- und stabilitätsrelevante- Nachweise erbringen bevor mit dem Bau begonnen werden darf. Ähnlich verhält es sich bei Modifikationen an bestehenden Fluggeräten. Augenscheinlich kleinere Modifikationen können Auswirkungen auf das Flugverhalten und die Stabilität haben. Wer hier keine genauen Kenntnisse der Aerodynamik hat kann nicht einmal entscheiden ob die Änderungen überhaupt sinnvoll und zulässig sind - ggf. sind sie sogar gefährlich. "try and error" kann man sich im Modellbau leisten - und das macht u.A. auch den Reiz aus -, nicht aber in der manntragenden Fliegerei.

### Neue Begriffe gegen alte Denkmuster

Fluggeräte und Rennfahrzeuge sind heute weitgehend hoch entwickelt, wer hier noch Verbesserungen erreichen will, muß sich mit Details befassen. Wenn das allgemeine Verständniss nicht stimmt, dann kommt man nicht weit. Das größte Hinderniss um eingefahrene Gedankenwege und halbware Schulweisheiten verlassen zu können ist der konsequente Nichtgebrauch des Begriffs "Strömung". Immer und immer wieder wird er uns eingehämmert und der "Strömungsabriss" ist der Supergau schlechthin. Deshalb sind Alle aufgefordert Alternativbegriffe vorzuschlagen.



Da es sich in erster Linie um ein Luftdrucksystem um den Tragflügel und im Besonderen um den Tragflügelquerschnitt handelt und die geringen Verschiebungen von Luftteilchen in keinem Verhältnis zu der Geschwindigkeit des Flügels an sich stehen, ist der Begriff "Strömung" irreführend. Es wird bis auf Weiteres "**Druckverteilung**" (die Strömung => die Druckverteilung) und "**Druckkollaps**" (der Strömungsabriss => der Druckkollaps) vorgeschlagen. Zugegeben nicht ganz so elegant aber dafür richtiger und mit gleichen Artikeln, sodaß die Begriffe leicht ausgetauscht werden können.

## Einleitung

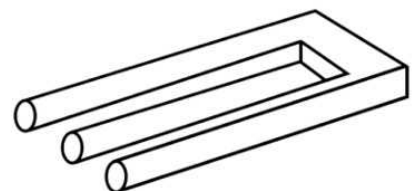


Aerodynamik beschreibt das Verhalten von Körpern in kompressiblen Fluiden (zum Beispiel Luft). Die Aerodynamik beschreibt die Kräfte, die es beispielsweise Flugzeugen ermöglichen, zu fliegen oder Segelschiffen, sich mit Hilfe des Windes durchs Wasser zu bewegen. Viele weitere Bereiche der Technik, wie zum Beispiel das Bauingenieurwesen oder der Fahrzeugbau, müssen sich mit der Aerodynamik auseinandersetzen. Allgemeine Info dazu findet man vielerorts - natürlich auch in Online-Wissensdatenbanken.



Im Nachfolgenden wird vorrangig Aerodynamik aus dem Blickwinkel der Luftfahrt betrachtet. Es gibt aber keine spezielle Aerodynamik für die verschiedenen technischen Gebiete. Angewandte Aerodynamik im Fahrzeugbau (z.B. Spoiler im Rennsport) ist genau so spannend und unterliegt den selben Gesetzmäßigkeiten. Im Besonderen wird nachfolgend der Segelflug betrachtet. Für den Autor ist das die Königsdisziplin, was natürlich nicht von allen Technikern so gesehen wird. Gute Aerodynamiker haben ein umfassendes Verständnis über das Verhalten der Luft, im Besonderen, wenn Körper sich darin bewegen und Luftmassen verdrängen. Und das ist auch schon das Geheimnis: Körper bewegen sich und verdrängen, nicht umgekehrt - später davon mehr. Rechnen kann man viel, wie genau die Ergebnisse mit der Wirklichkeit übereinstimmen ist offen. Gute Aerodynamiker haben ein Gespür für fließende Formen und denken sich in das elastische Medium Luft hinein - mehr ein intuitiver Vorgang als ein Technischer.

Viel Literatur gibt es zu dem Thema und zweifellos ist dieses manchmal hilfreich. Nachfolgendes wurde nicht neu erfunden aber selbst nachgedacht und manchmal neu gedacht. Abgeschrieben wurde so gut wie gar nicht, und wenn, dann unbewußt oder es wurde übernommen weil es einfach richtig war. Es geht um ein ganzheitliches Bild, das aus allen Richtungen schlüssig ist und nicht um Teilaspekte die losgelöst vom Ganzen beeindruckend sind aber nicht ins Ganze passen (z. B. Zirkulationstheorie).



## Fliegen erklärt



Fliegen ist die kontrollierte Fortbewegung eines Körpers durch die Luft. Da Segelflugzeuge schwerer als Luft sind, können sie nur aerodynamisch (aerokinetisch) fliegen. Thermik hilft zu steigen, erklärt aber nicht das Grundprinzip des aerodynamischen Fliegens, schließlich fliegen Segelflugzeuge auch ohne Thermik. Auch das bloße Vorhandensein eines Flügels an sich, führt noch nicht zum

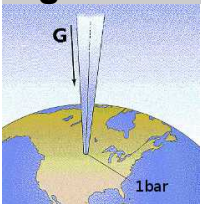
Fliegen. Wenn Bewegung (dynamik - aerodynamik) ins Spiel kommt, dann ist aber ein Flügel sehr hilfreich. Ja nur "hilfreich". Stellen wir uns ein Motor-Kunstflugzeug im Messerflug-Vorbeiflug vor - der Flügel hat in dieser Flugfigur keine tragende Funktion. Wenn der Flügel an sich das Fliegen nicht begründet, dann kann auch das Flügelprofil die eigentliche Antwort nach der Ursache des Fliegens nicht geben. Selbst mit klassischen unsymmetrischen Profilen können einige Flugzeuge kontrollierten Rückflug absolvieren.



Für das Verständnis

des Grundprinzips des Fliegens sind die elementaren Naturgesetze heranzuziehen. Sie sind universell und immer anwendbar. Die Naturgesetze sind gleichermaßen für z. B. Fahrzeuge, Flugzeuge, Vogelflug, Insekten, Überschallflugkörper, Modellflugzeuge, Hubschrauber, Fallschirmspringer oder Sonstiges anwendbar und widersprechen sich nicht.

## Eigenschaften der Luft



Das Gasgemisch, in dem wir uns beim Fliegen fortbewegen, hat erstaunliche Eigenschaften. 1 m<sup>3</sup> Luft hat in Bodennähe ein Gewicht von nahezu 1,3kg (0°C). Noch Beeindruckender ist der Druck den die Luftsäule über uns erzeugt: 10 000kg/m<sup>2</sup> (10 Tonnen/m<sup>2</sup>) oder Fliegern mehr bekannt als 1000 mbar (hPa). Bei diesem hohen Druck, den wir nicht wahrnehmen (weil er von allen Seiten auf uns einwirkt und sogar von

innen dagegen drückt), können schon geringste Luftdruckschwankungen enorme Kräfte bewirken.

Bei Luftmassenverschiebungen (Hoch-/Tiefdruck) werden unvorstellbare Kräfte frei, selbst geringste Druckunterschiede durch Höhenänderung können mit Fluginstrumenten angezeigt werden (Druckunterschiede in der Höhe von unter einem Meter), kleine Saugnäpfe in Technik und Haushalt halten erstaunliche Lasten, enorme Gewichte schweben auf Luftkissen.... Das hohe Energiepotential des Luftdrucks entzaubert das Phänomen Fliegen weil bereits kleinste Druckunterschiede hohe Kräfte bewirken.

## Naturgesetze und ihre Effekte



Die elementaren Gesetzmäßigkeiten wie Gravitation, Impulserhaltung und Masseträgheit sind für das Fliegen relevant. Die von ihnen abgeleiteten Zusammenhänge von Strömungsgeschwindigkeit und Druck (Bernoulli oder Venturi) sind Teilaspekte und erklären nicht das Prinzip des Fliegens an sich weil diese nur für bestimmte Umgebungsbedingungen gelten. Die

Experimente dieser Entdecker beschreiben Effekte der Gasdynamik, andere Forscher untersuchten Phänomene wie die Schallausbreitung in Luft oder das Kompressionsverhalten von Luft.

Weil sich das Fliegen im freien Raum abspielt, gibt das Verhalten von Gasen in der freien Atmosphäre die Antworten auf die Frage wie fliegen möglich wird. Die Antworten stehen im Kontext mit den elementaren Gesetzmäßigkeiten. Versuchsanordnungen wie zum Beispiel eine Venturidüse oder eine Strömung nach Bernoulli mögen anschaulich sein, sie sind aber nur Teilaspekte der physikalischen Gegebenheiten.

Die Luft ist ein Gasgemisch. Gase sind selbst in Bewegung und geben Impulse weiter. In Verbindung mit der Gravitation, wird Gasdruck erzeugt. Kommt es z. B. durch einen Flügel zu Druckunterschieden zwischen Flügelunte- und oberseite, so wirken Kräfte auf den Flügel ein weil sich Druckunterschiede ausgleichen möchten. Das ist es, was dynamisch ein Flugzeug in der Luft hält.



## Einheitliches Betrachtungssystem

(das Flugzeug bewegt sich – nicht anders herum)



Die Erfindung des Windkanals machte aerodynamische Versuche einfacher. Im Windkanal steht das Objekt, die Luftmasse bewegt sich. Die Ergebnisse von Messungen sind ähnlich der Wirklichkeit. Wenn man in die bewegte Luft Rauch einbläst, sieht man die Bahn der bewegten aneinander

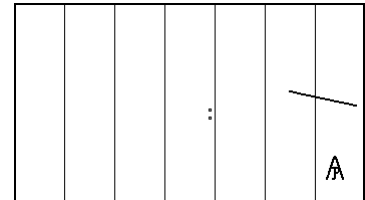
gereihten Luftteilchen, das Bild einer Strömung wird erkennbar. Das ist aber nicht die Wirklichkeit beim Fliegen in freier Natur, es ist nicht die Flugbahn eines einzelnen Luftteilchens. Der Windkanal ist eine Versuchsanordnung. Jeder Pilot weiß, daß er sich üblicherweise mit seinem Flugzeug bewegt und die Luft nahezu steht. Wenn Gegenwind herrscht, dann ist das ganze System Luftmasse in Bewegung, also das Betrachtungssystem an sich.

Luftmoleküle geben ihre Impulse an andere Luftmoleküle weiter. Um zu verstehen wie diese Impulse sich an betroffenen Festkörpern bemerkbar machen ist es notwendig, daß man die Luft und die Luftteilen an sich und deren Verhalten versteht. Deshalb ist die Auswahl des richtigen Betrachtungssystems so wichtig. Ohne Medium (Luft) gibt es kein aerodynamisches Fliegen, ein Flugzeug kann im luftleeren Raum nicht fliegen.

Experimentelle Versuchsanordnungen nutzen andere Medien wie Gase mit höherer Dichte oder Flüssigkeiten wie z.B. Wasser. Werden die Parameter unter Berücksichtigung der Reynold'schen Zahl entsprechend gewählt kommt man zu ähnlichen Ergebnissen als in Luft.

Ein Flugzeug ist nur ein Objekt von Vielen die fliegen. Deshalb kann Aerodynamik nicht am Betrachtungssystem Flugzeug festgemacht werden sondern muß sich am Medium orientieren, in unserem Fall ist es das Medium Luft. Moderne mathematische Ansätze nutzen die dreidimensionale Finite Elemente Methode die erst durch leistungsfähige Rechner möglich wurden. Inwieweit nicht nur die Druckverhältnisse in den einzelnen Elementen hinreichend genau gerechnet werden können, sondern auch die dadurch indizierten Relativbewegungen der Elemente, ist dem Verfasser noch nicht bekannt. Für die Vorausberechnung der entstehenden Relativbewegungen wie zum Beispiel Wirbel ist die neben der statischen Druckverteilung auch die relative Dynamik von Interesse.

Um zu verstehen, was an einem Flugzeug, und im Besonderen an einem Flügelprofil passiert, stellt man sich ein einzelnes Luftteilchen vor (nicht eine Aneinanderreihung von permanent neuen Luftteilchen wie bei einer Rauchfahne). Es ist nicht egal welche Bezugsebene (Luft oder Flugzeug) gewählt wird.



animierte Bildquelle: Jan Peter Apel [Flugtheorie.de](http://Flugtheorie.de)

Eine Strömung, wie sie durch die Rauchfahne suggeriert wird, gibt es am Flügelprofil nicht. Bernoullieffekte offenbaren nicht das Grundprinzip des Fliegens weil die Strömung nach Bernoulli beim Fliegen so nicht existiert (es gibt keine Strömung um das Flügelprofil, das Flugzeug ist in Bewegung, die Luft steht nahezu). Die Energie steckt im Flugzeug (Lageenergie wird in Bewegungsenergie umgewandelt) und nicht in der Luft. Bei Versuchen mit angeblasenen Papierstreifen oder Tischtennisbällen wird Luft höherer Energie (zugeführte Geschwindigkeit) verwendet, das hat mit der Wirklichkeit beim Fliegen nichts zu tun.

## Das physikalische Grundprinzip

(siehe auch Effekte und Gesetzmäßigkeiten – Bernoulli & Co.)

$\rho A c^2 + \sum F = 0$  Die Schwerkraft zwingt alles was schwerer als Luft ist, nach unten (Newton  $9,8\text{m/s}^2$  - Beschleunigung). Der umgangssprachliche Auftrieb ist die Gegenkraft die aus dem beschleunigten Fallen ein konstantes Sinken (z.B.  $0,7\text{m/s}$ ) macht. Der Effekt, beschrieben durch das dritte newtonsche Axiom (actio und reactio), oder aus moderner Sicht die Impulserhaltung, ermöglicht das Entstehen des Auftriebs.

Ein Flugzeug ist Masse, Luft ist Masse, runtergebrochen auf kleinster Ebene sind auch Gasatome und Moleküle Masse. Impulse (Bewegung/Beschleunigung) zwischen Ihnen und anderen Massen wirken wechselseitig. Der Luftdruck ist die Summe aller Gasteildrücke. Konstanter Luftdruck bedeutet nicht, daß im System Luft absolute Ruhe herrscht sondern daß die Kräfte (Drücke = Bewegung der Atome und Moleküle) im Ausgleich sind.

Da sich Fliegen in der Luft abspielt, können auch nur Luftkräfte auf das Flugzeug einwirken. Sowohl im Unter- also auch Überschallbereich sind es die Wechselwirkungen der Impulse zwischen Körper (Rumpf/Flügel usw.) und der Luftmasse. Luft kann nur Druck weitergeben, sie kann nicht „ziehen“ sodaß Unterdruck an sich nur Druckunterschiede bewirkt und damit der relativ höhere Druck wirken kann. Um der Schwerkraft entgegen zu wirken, muß im Flug die Summe aller Druckkräfte, die auf das Flugzeug, i. B. auf den Flügel, einwirken, aufwärts, d. h. der Schwerkraft entgegen gerichtet sein.

## Luftdruckkräfte wirken auf das Gesamtsystem Flugzeug ein

(Die Relationen der Druckunterschiede)

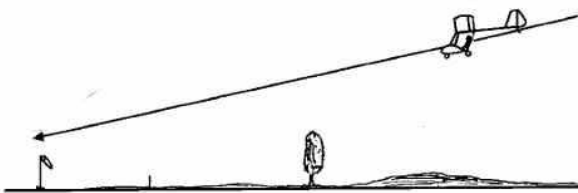


Der Luftdruck von 1 bar wirkt mit ca. 10 Tonnen auf 1 m<sup>2</sup> ein. Die Flügelfläche eines Segelflugzeugs hat ca. 10m<sup>2</sup>, seine Masse ist z. B. 333 kg. Um es vereinfacht zu veranschaulichen genügt bereits eine Druckdifferenz von 1/333 bar auf dem Flügel um das Flugzeug in der Luft zu halten. D.h. dem Normaldruck auf der Unterseite von 1000 mbar (z. B. im Schnellflug) steht ein Unterdruck von 997 mbar entgegen. Bei der vielfach angenommenen Druckverteilung von 1/3 Druck von unten und 2/3 Sog oben wäre das Verhältnis 1001 mbar unten (also ~1 mbar Überdruck) und 998 mbar oben (also nur ~2mbar Unterdruck). Vielfach wird der Eindruck erweckt, es handelt sich beim Fliegen um starke Druck- und Sogkräfte (Vakuum) was hiermit richtig gestellt werden soll.

(Beispiel Standardklasse-Segelflugzeug bestes Gleiten bei 100km/h)

Bei einer Flächenbelastung von ca. 32kg/m<sup>2</sup>, 12 m<sup>2</sup> Flügelfläche, 28m/s Fluggeschwindigkeit und 15m Spannweite (überflogene Fläche = 432m<sup>2</sup>/s) wird ca. 65 kg/s Luft auf eine Geschwindigkeit von 2x 2,625 m/s beschleunigt (Unterseite +Oberseite). Das ergibt eine Gegenkraft zur Schwerkraft von ca. 3400 N (~340 kg). Diese Kraft ist die unmittelbare Reaktion (Impuls) auf die nach unten beschleunigte Luftmasse.

## Die Flugbahn - eine Frage der Energie



Segelflugzeuge gleiten immer auf einer geneigten Bahn, sie verlieren also permanent Lageenergie (innewohnende Energie). In Thermik, d.h. aufsteigender Luft, kann ein Segelflugzeug Höhe gewinnen also Lageenergie hinzugewinnen. Die Flugbahn

innerhalb der Thermik ist aber nach wie vor eine nach unten geneigte Bahn. Das Betrachtungssystem Luft als Ganzes ist bei Thermik in Bewegung (vertikal). Nach dem Energieerhaltungsgesetz wird die Lageenergie des fliegenden Segelflugzeugs permanent umgewandelt, ein Großteil wirkt mit Hilfe des Flügels nach oben (Auftrieb) ein kleiner Teil wird zur Überwindung des horizontalen Widerstands benötigt. Das Verhältnis dieser beiden Kräfte beschreibt den bekannten Gleitwinkel. Um vergleichbare Angaben zwischen den Gleitwinkeln verschiedener Flugzeuge zu erhalten, müssen gleiche Bedingungen vorausgesetzt werden, z. B. Testflüge in ruhender Luftmasse. Die Gleitwinkelangaben errechnen sich aus dem Sinken des Flugzeugs bei der dazugehörigen Fluggeschwindigkeit. Dies wird üblicherweise in Diagrammen grafisch dargestellt.

Motorflugzeuge, Vögel und sonstiges Fluggerät können nur auf nach unten geneigten Bahnen fliegen wenn sie keine zusätzliche Energie aufwenden. Diese zusätzliche Energie (nicht die potentielle Lageenergie) kann zum Beispiel der Treibstoff eines laufenden Motors sein oder die Muskelkraft der Vögel bzw. Insekten. Wird keine zusätzliche Energie aufgewendet ist der Gleitflug nach unten geneigt. Wird mehr Energie aufgewendet als für einen Horizontalflug notwendig ist, kann das Flugzeug steigen, der Gleitwinkel ist dann nach oben geneigt, und/oder die Fluggeschwindigkeit erhöht sich.

Motorflugzeuge stürzen nicht unbedingt unkontrolliert ab wenn der Motor ausfällt, wie ein Segelflugzeug können sie nach unten gleiten, natürlich ist der Gleitwinkel deutlich schlechter als bei einem Segelflugzeug. Auch Motorflugzeuge können im kraftlosen Flug Thermik nutzen um ihr absolutes Sinken in Bezug zur Erdoberfläche zu verbessern, Höhengewinn ist in der Regel bei üblichen Thermikstärken aber nicht möglich. Reisemotorsegler sind konstruktiv zwischen Segelflugzeug und Motorflugzeug angesiedelt, mit diesen gelingt es auch Thermik für einen Segel-Streckenflug zu nutzen.

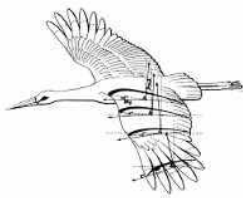


Durch die feste Verbindung eines Schleppverbandes (Motorflug-Schlepp oder Windschlepp) ist dieser Verband als Einheit zu sehen, die zugeführte Energie wird entweder vom Motorflugzeug oder von der Winde aufgewendet. Um den Energiehaushalt des Flugzeugs im Flug stabil zu halten (d.h. die innewohnende Energie auf stabilem Niveau zu halten) und damit einen permanenten

horizontalen Flug zu ermöglichen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Segelflugzeuge tanken Lageenergie durch Nutzen der Thermik (falls vorhanden - zeitlich begrenzt durch den Sonnenstand), einige Militärflugzeuge können während des Fluges betankt werden, einige Flugzeuge nutzen im Flug Sonnenenergie um damit Antriebsbatterien aufzuladen, selbst einige Vögel können im Flug Nahrung aufnehmen.



## Was passiert rund um das Flügelprofil?



Das ist ein weites Feld und eine nicht leicht zu beantwortende Frage. Welcher Zustand soll beschrieben werden? Wenn ein Flügel beginnt sich zu bewegen? Wenn er im Schnellflug ist? Wenn er langsam fliegt? Vielleicht im Kreisflug oder bei der Landung, mit und ohne Klappen....? Die Parameter sind bei diesen Flugzuständen vor allem

Geschwindigkeit und Anstellwinkel. Soll dabei die Oberflächenreibung mit berücksichtigt werden (Grenzschicht – Ablöseblase usw.)? Hier sollen Aerodynamiker sprechen. Diese Details sind spannend und für die Leistung eines Segelflugzeugs sehr wichtig. Für einen groben Überblick, der zwar nicht ins Detail geht aber physikalisch richtig ist, sollte folgende Erklärung genügen:

Die Unterseite des Flügelprofils erfaßt in der Bewegung Luftteilchen und drückt sie nach unten weg, dabei werden diese mehr oder weniger gleichmäßig nach unten beschleunigt (actio/reactio) eine Gegenkraft entsteht. Durch die Masseträgheit bildet sich zusätzlich ein geringer Überdruck aus. Auf der Profiloberseite öffnet sich in der Bewegung des Flügels Raum durch die abfallende Profilkontur. Dieser kann durch die Masseträgheit nicht sofort vollständig mit Luft aufgefüllt werden, ein Bereich geringeren Drucks entsteht. Im Ergebnis wird Luftmasse sowohl von der Unterseite als auch von der Profiloberseite nach unten abgelenkt, diese Masseverschiebung wirkt entgegengesetzt auf den Flügel zurück (actio reactio). In der Bewegung werden diese Druck und Unterdruckbereiche permanent neu gebildet und existieren im Bereich des Flügelprofils. Es wird eine Schleppe von abwärts gerichteter Luft hinter dem Flügel zurück gelassen die sich langsam auflöst, an den Flügelenden vermischen sich diese abwärtsgerichtete Luftmasse mit der in Ruhe befindlichen Umgebungsluft in Form von Wirbeln.

Druck (und Unterdruck) sind in freier Natur nicht eingesperrt, d.h. Druckausgleich geschieht in allen Richtungen. Die Geschwindigkeit des Flugzeugs unter Berücksichtigung

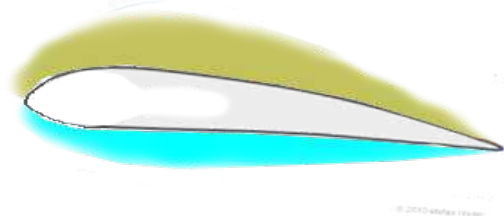
der Masseträgheit (Zähigkeit der Luft) bewirkt, daß sich Druck- und Unterdruckbereiche über den unmittelbaren Entstehungsort hinaus ausbreiten. Die Überlagerung dieser Faktoren führt zu einer Druck- Unterdruckverteilung die man sich stationär schlecht vorstellen kann weil sie in der Bewegung permanent gebildet und ausgeglichen wird.

Ober- und Unterseite des Profils wirken somit gemeinsam am Auftrieb zusammen wenn keine Störung (z. B. durch zu hohe Unterdrücke der Oberseite) auftreten. Da Gase Druck ausüben aber keine Zugkräfte entwickeln, ist der gesamte Auftrieb die Resultierende der aufwärts gerichteten Drücke, wobei Unterdruck auf der Flügeloberseite es dem Druck der Unterseite erleichtert die Kraft zu übertragen. Das Wort „angesaugt“ suggeriert, als wenn dieser an einem Körper ziehen könnte, tatsächlich aber tut sich die Seite mit dem höheren Druck nur leichter wenn auf der anderen Seite geringerer Druck herrscht.

Profile sind dann optimiert wenn der Abwind sowohl von Unter-als auch Oberseite nach dem Flügel harmonieren, d. h. nahezu gleiche Geschwindigkeit haben. Und das in einem weiten Geschwindigkeits- und Anstellwinkelbereich. Hier tut sich ein weites Feld für Profilentwickler auf weil Geschwindigkeit und Anstellwinkel im praktischen Flug sehr variieren. Weitere Überlegungen zu Widerstand, Überziehverhalten usw. kommen dazu. Für eingegrenzte Bedingungen kann ein theoretisches Optimum gefunden werden, welche aber beim praktischen Fliegen nicht immer gegeben ist. Neben der reinen technischen Auslegungen sind es auch Wetter/Thermikmodelle die die Konstruktion von Segelflugzeugen beeinflussen, so kann der Verwendungszweck eines Segelflugzeugs von einem einfach zu fliegenden Leichtwindsegler bis hin zu einer Wettbewerbsmaschine gehen. Segelflugzeugbau ist ein wirklich spannendes Feld der Technik.

## Zusammenfassung – Entstehung des Auftriebs

Da Segelflugzeuge schwerer als Luft sind, können sie nur aerodynamisch fliegen. Das hohe Energiepotential des Luftdrucks entzaubert das Phänomen Fliegen weil bereits kleinste Druckunterschiede hohe Kräfte bewirken. Bernoullieffekte offenbaren nicht das Grundprinzip des Fliegens weil die Strömung nach Bernoulli beim Fliegen so nicht existiert, es gibt keine Strömung, das Flugzeug ist in Bewegung, die Luft steht. Die Energie steckt im Flugzeug (Lageenergie) und nicht in der Luft. Segelflugzeuge gleiten auf einer geneigten Bahn, die verlieren also permanent Lageenergie. Luft kann nur Druck weitergeben, sie kann nicht „ziehen“ sodaß Unterdruck an sich nur Druckunterschiede bewirkt und damit der relativ höhere Druck wirken kann. Um der Schwerkraft entgegen zu wirken, muß im Flug die Summe aller Druckkräfte, die auf das Flugzeug, i. B. auf den Flügel, einwirken, aufwärts, d. h. der Schwerkraft entgegen gerichtet sein. Um es vereinfacht zu veranschaulichen genügt bereits eine Druckdifferenz von z. B. 1/333 bar auf dem Flügel um das Flugzeug in der Luft zu halten.



Die Unterseite des Flügelprofils erfaßt in der Bewegung Luftteilchen und drückt sie nach unten weg, dabei werden diese mehr oder weniger gleichmäßig nach unten beschleunigt (actio/reactio) eine Gegenkraft entsteht. Durch die Masseträgheit bildet sich zusätzlich ein geringer Überdruck aus. Auf der Profiloberseite öffnet sich in der Bewegung des Flügels Raum durch die abfallende Profilkontur. Dieser kann durch die Masseträgheit (Zähigkeit) nicht sofort vollständig mit Luft aufgefüllt werden, ein Bereich geringeren Druck entsteht. Im Ergebnis wird Luftmasse sowohl von der Unterseite als auch von der Profiloberseite



nach unten abgelenkt, diese Masseverschiebung wirkt entgegengesetzt auf den Flügel zurück (actio reactio). In der Bewegung werden diese Druck und Unterdruckbereiche permanent neu gebildet und existieren im Bereich des Flügelprofils. Es wird eine Schleppe von abwärts gerichteter Luft hinter dem Flügel zurück gelassen die sich langsam auflöst, an den Flügelenden vermischen sich diese abwärts gerichtete Luftmasse mit der in Ruhe befindlichen Umgebungsluft in Form von Wirbeln.