

Was ist Fliegen? – allgemeine Einleitung

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.

Die Luft und ihre Eigenschaften

Das Gasgemisch, durch das wir uns beim Fliegen fortbewegen, hat erstaunliche Eigenschaften. 1 m³ 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/m² (10 Tonnen/m²) 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 abgeleitete Effekte – Bernoulli & Co.

Die elementaren Gesetzmäßigkeiten wie Gravitation, Impulserhaltung und Masseträgheit sind für das Fliegen relevant. Die von ihnen abgeleiteten Effekte wie z- B. Strömung nach Bernoulli oder Venturi müssen differenziert betrachtet werden da für sie bestimmte Umgebungsbedingungen gelten. Ihre Experimente beschreiben Effekte der Gasdynamik, andere Forscher untersuchten Phänomene wie die Schallausbreitung in Luft oder das Kompressionsverhalten von Luft. Da sich Fliegen im freien Raum abspielt, gibt das Verhalten von Gasen in der freien Atmosphäre, im Kontext mit den elementaren Gesetzmäßigkeiten, die Antworten. Versuchsanordnungen wie eine Venturidüse oder eine Strömung nach Bernoulli mögen anschaulich sein, 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 unten und oben so wirken Kräfte da sich Druckunterschiede ausgleichen möchten. Das ist es, was dynamisch ein Flugzeug in der Luft hält.

Ein 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 einbläht 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**. Der Windkanal ist eine Versuchsanordnung. Jeder Pilot weiß, daß er sich mit seinem Flugzeug bewegt und die Luft steht, das ändert sich auch nicht, wenn Gegenwind herrscht. Um zu verstehen, was an einem Flugzeug, und im Besonderen an einem Profil 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. 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, das Flugzeug ist in Bewegung, die Luft steht). Die Energie steckt im Flugzeug (Lageenergie) 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 des aerodynamischen Fliegens

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

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. 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.

Ein simples Beispiel zum aufzeigen der Relationen

Der Luftdruck von 1 bar wirkt mit ca. 10 Tonnen auf 1 m^2 ein. Die Flügelfläche eines Segelflugzeugs hat ca. 10m^2 , 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 unten 1001 mbar unten (also ~ 1 mbar Überdruck) und 998 mbar oben (also nur ~ 2 mbar Unterdruck). Vielfach wird der Eindruck erweckt, es handelt sich beim Fliegen um starke Druck- und Sogkräfte (Vakuum) was hiermit richtig gestellt werden soll.

Luftkräfte wirken auf das Gesamtsystem Flugzeug ein

(Beispiel Standardklasse-Segelflugzeug bestes Gleiten bei 100km/h): Bei einer Flächenbelastung von ca. 32kg/m², 12 m² Flügelfläche, 28m/s Fluggeschwindigkeit und 15m Spannweite (überflogene Fläche = 432m²/s) wird ca. 65 kg/s Luft auf eine Geschwindigkeit von 5,25 m/s beschleunigt. 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.

Segelflugzeuge gleiten auf einer geneigten Bahn, die verlieren also permanent Lageenergie. Nach dem Energieerhaltungsgesetz wird die Energie 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.

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 Luftpilchen 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 Druck- und Unterdruckbereiche sich 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.

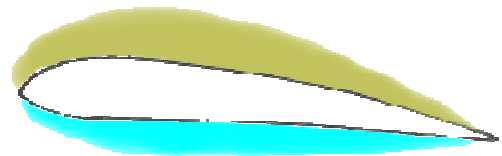
Ober- und Unterseite des Profils wirken somit gemeinsam am Auftrieb zusammen wenn keine Störung (z. B. durch zu hohe Unterdrücke der Oberseite) auftreten. Da Gase Druck bilden aber keine Zugkräfte entwickeln, ist der gesamte Auftrieb die Resultierende der aufwärts gerichteten Drücke, wobei Unterdruck 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. sowohl vertikale Geschwindigkeit als auch Druck gleich sind. 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.

Arbeitsversion: Stand März 2015 Autor H. Kiefel