

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung

Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Ursache und Wirkung



Beides ist untrennbar miteinander verbunden.

Zur Entstehung des dynamischen Auftriebs kann man mittlerweile richtige Teil-Erklärungen finden (z.B. Wikipedia). Anderweitig werden Erklärungen zu diesem Thema durch die Vermischung mit Effekten wie Bernoulli Gleichung, Coandă-Effekt, Zirkulationstheorie, Venturi-Effekt, Strömungsumlenkung... vernebelt. Die Vernebelung wird umso stärker, je mehr dazu mathematische Gleichungen präsentiert werden. Es ist dann nicht mehr erkennbar, was die physikalisch wahre Ursache ist und was nur zur Veranschaulichung dient. Die vorgenannten Effekte stehen mit dem Fliegen schon in Verbindung, sie sind aber nicht ursächlich. Effekte sind Wirkungen, nur Naturgesetze können letztendliche Ursachen begründen. Um die Natur zu verstehen bedarf es keiner Mathematik, weshalb wir darauf auch verzichten.

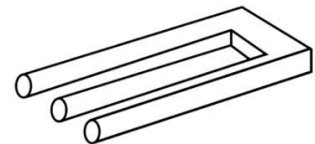
Wie bei allen scheinbar komplexen Themen sollte man sich zunächst einen Überblick verschaffen. Es sollen Zusammenhänge einfach dargestellt werden, aber nicht so, dass sie durch Vereinfachung falsch werden. Später werden weniger gebräuchliche Begriffe gewählt, um sich von alten Denkmustern lösen zu können.

Wenngleich gerade in der Physik die exakte Wortwahl entscheidend ist, wollen wir uns darin nicht verlieren, so werden z.B. die Begriffe Impuls, Stoß, Energie, Kraft usw. im Dienste der Allgemeinverständlichkeit auch schon mal im erweiterten Sinne gebraucht. Es gibt keine neuen Erkenntnisse, aber möglicherweise wird bekanntes Wissen in einem anderen Licht gesehen. Ziel soll sein, die letztendliche Ursache des dynamischen Auftriebs heraus zu finden. Die Wirkungen als Folge von Ursachen dürfen aber nicht unbeachtet bleiben weil sie Teil einer Kausalkette sein können. Ursache und Wirkung sind untrennbar miteinander verbunden. Im Übrigen: Egal welche Theorien man vertritt, ein Pilot kann, bei Einhaltung der vorgegebenen Betriebsgrenzen, sein Fluggerät trotzdem sicher beherrschen.

Offensichtlich spielt es keine große Rolle ob man die Ursache des Fliegens und die Entstehung des Auftriebs physikalisch korrekt vertritt.

Die Meisten von uns sind Piloten und keine Konstrukteure / Physiker / Statiker die noch Festigkeit, Stabilität, Steuerbarkeit ... im Auge haben müssen. Man kann sich jedoch weiter entwickeln, wenn man die Basics über die Luft und einigen physikalischen Grundkräften wieder mal reflektiert.

Hinweis an angehende Piloten und Studenten: Lernt was in den Büchern steht, kreuzt die „richtigen“ Antworten an, rechnet wie vorgegeben, wiederholt was erwartet wird. Schließlich will man die Prüfungen bestehen.



Unmögliche Perspektive.
Entkommen zwecklos.

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Aerodynamik / Aerokinetik



Foto: Rüdiger Bachmeier

Aerodynamik / Aerokinetik beschreibt das Verhalten von Körpern in kompressiblen Fluiden (zum Beispiel Luft). Kinetik deshalb weil es um Bewegung geht. Unsere Luftsportgeräte bewegen sich in der Luft, die Luft wird durch die Bewegung zwangsläufig zum Ausweichen genötigt.

Angewandte Aerodynamik im Fahrzeugbau ist genau so spannend und unterliegt denselben Gesetzmäßigkeiten. Im Rennsport ist Auftrieb ein Thema. Allerdings wird das Gegenteil angestrebt, Abtrieb - um die Bodenhaftung zu verbessern. Gute Aerodynamiker haben ein Gespür für fließende Formen und denken sich in das elastische Medium Luft hinein - mehr ein intuitiver Vorgang als ein Technischer. Z.B. hatte Luigi Colani u. A. auch Aerodynamik studiert aber in seinem Wesen war er begnadeter Designer.

Alles was sich in der Luft dynamisch fortbewegt unterliegt den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Es ist egal ob es sich um ein Luftsportgerät, Auto, Vogel, Kolibri, Hummel, Insekt, Modellflugzeug, Hubschrauber, Tragschrauber, Fallschirmspringer, Stein, Ball oder Sonstiges handelt. Wenn sich Körper in Luft bewegen verdrängen sie dabei Luft. Durch die Geschwindigkeit der Körper (z.B. Rumpf, Flügel, Propeller) wird Luft relativ schnell verdrängt, also beschleunigt.

Im Gegensatz zu einem Fahrzeug welches u. A. Luftwiderstand überwinden muss, kommt beim Fliegen noch hinzu, dass die Gravitation permanent versucht das Fluggerät zu Boden zu zwingen. Die Strategie um gegen die Gravitation anzukämpfen heißt Auftrieb erzeugen.



Foto: NASA Dominic Hart

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Auftrieb versus Gravitation



Foto: Indoor Skydiving Bottrop - Was würde passieren wenn jetzt ein Schirm gezogen wird? Die schlagartige Erkenntnis: Das vertauschen eines Inertialsystems hat Folgen (siehe auch "Strömung im Windkanal").

Wir reduzieren hier den Begriff Gravitation auf die Erdanziehung. Der Gravitation entgegen wirken heißt eine entgegengesetzte Kraft aufbringen. Es spielt keine Rolle ob die Ursache der Gravitation schon geklärt ist. Als Äthertheorie, nach Einsteins ART, quantenphysikalisch als Graviton oder sonst wie. Was können wir beobachten und messen? Sehen wir es doch einfach aus der Sicht der Wirkung, der klassischen Mechanik. Die Erdbeschleunigung beträgt $9,8\text{m/s}^2$. Die Gravitationskonstante kann man, in den Höhen in denen wir fliegen, ignorieren.

Beispiel Fallschirmspringer: In der ersten Sekunde wurde $4,9\text{m}$ zurückgelegt, in der zweiten Sekunde schon $19,6\text{m}$ und in der dritten Sekunde $44,1\text{m}$ (bei Vernachlässigung des Luftwiderstands). Diese Geschwindigkeitszunahme (keine gleichmäßige Bewegung) würde nur im Vakuum so weitergehen, glücklicherweise steigt der Luftwiderstand aber an, sodass nach ca. 7 Sekunden die Endgeschwindigkeit erreicht wird. Offensichtlich erzeugt der Luftwiderstand (Beschleunigung von Luft nach unten durch den fallenden Springer) eine Kraft, welche aus der

Erdbeschleunigung (m/s^2) für den Springer eine konstante Sinkgeschwindigkeit (m/s) macht. Auch Fluggeräte haben eine vertikale Geschwindigkeit – keine vertikale Beschleunigung. Ebenfalls gemessen in m/s wobei diese nur im Horizontalflug gerade 0 m/s beträgt.

Der Auftrieb ist die Gegenkraft zur Gravitation. Aus einer Beschleunigung wird Geschwindigkeit. Da Fliegen in der Luft stattfindet, kann ein Flugzeug nur auf die Luft einwirken um eine Gegenkraft zu erzeugen.

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Fliegen mit Flügeln



Foto: EXTRA Flugzeugproduktion- u. Vertriebs-GmbH

Fliegen ist kontrollierte Fortbewegung eines Körpers durch die Luft. Flügel sind spezielle Flächen die dazu geeignet sind Auftrieb zu erzeugen. Dazu sind sie in einem relativ flachen Winkel zu ihrer Bewegungsrichtung angestellt. Auch Rotorblätter, Propeller, Insektenflügel usw. sind Flügel die Auftrieb oder je nach Ausrichtung, Vortrieb erzeugen können.

Alles was schwerer als Luft ist, wie z.B. unsere Luftsportgeräte, kann nur dynamisch fliegen. Auch wenn Fluggeräte nahezu ausnahmslos mit Flügeln ausgestattet sind, so offenbart die richtige Aussage „ein Flugzeug fliegt weil es Flügel hat welche auf die Luft einwirken“ noch nicht den physikalisch wahren Grund des Fliegens.

Wenn Bewegung (Dynamik - Aerodynamik) ins Spiel kommt, dann ist ein Flügel sehr hilfreich. In Sonderfällen wie im Messerflug geht es aber auch ohne.

Z.B. übernimmt im Messerflug der Rumpf im Wesentlichen die Funktion des Flügels (Auftriebserzeugung), ebenso leistet auch der Propeller seinen Teil dazu. Wenn das Vorhandensein eines Flügels die Ursache des Fliegens nicht vollständig begründen kann, dann kann auch das Flügelprofil die Antwort nicht geben. Noch dazu nicht, weil es nicht unbedingt eines Flügelprofils bedarf.

Mit einer ebenen Platte kann man auch fliegen, das Flügelprofil einer F-104 ist ohne Ausfahren der Auftriebshilfen nahezu eine ebene Platte, hauptsächlich aus Festigkeitsgründen ist eine geringe Verdickung vorhanden. Sonderform der ebenen Platte ist die gekrümmte Platte. Ober- und Unterseite haben dieselbe Lauflänge, die gekrümmte Platte ist deutlich effektiver als die Ebene. Das hat Lilienthal schon vor mehr als 130 Jahren herausgefunden. Natürlich ist uns klar, dass man mit ausgefeilten Flügel und Flügelprofilen den Auftrieb und das Flugverhalten signifikant optimieren kann.

Für das Verständnis des Grundprinzips des Fliegens sind die elementaren Naturgesetze/Grundkräfte, die auf auftriebsproduzierende Flächen wechselwirken, heranzuziehen. Diese Grundkräfte wurden bereits vor fast 340 Jahren untersucht und definiert.

Wenn in Folge trotzdem von Flügel, Flügelfläche und Profil gesprochen wird, dann nur deshalb, weil der Flügel eine optimierte auftriebsproduzierende Fläche darstellt. Die elementaren Naturgesetze sind universell anwendbar, auf alle Körper und damit auch auf Flügel. Die Gravitation haben wir bereits etwas angerissen, es ist an der Zeit sich mit dem Medium Luft zu beschäftigen.

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Der Luftdruck



Magdeburger Halbkugel Foto: Ulrich Arendt

Luft ist ein Gasgemisch und durch die Luftsäule wird statischer Druck (Luftdruck) erzeugt. Luft hat eine innere (kinetische) Energie weil Luftmoleküle (Masse) in Bewegung sind. In Bewegung befindliche Gasteilchen stoßen aneinander, können aber auch auf Körperoberflächen, wie z.B. auf eine Hohlkugel oder auf einen Flügel einwirken.

Der Luftdruck ist die resultierende Kraft pro Flächeneinheit, die durch die Bewegung (Impulse / Stöße) der Gasmoleküle erzeugt wird.

1 m³ Luft hat in Bodennähe ein Gewicht von ca. 1,3 kg. Noch beeindruckender ist der Druck den die Luftsäule über uns bei 1000 hPa erzeugt: ~10 Tonnen/m² lasten auf der Erdoberfläche und jeden m² unseres Körpers. Bei diesem hohen Druck, den wir nicht wahrnehmen (weil er auch von innen dagegen wirkt), können schon geringste Luftdruckschwankungen enorme Kräfte bewirken.

Im Wettergeschehen werden unvorstellbare Kräfte frei, selbst geringste Druckunterschiede können mit Instrumenten angezeigt werden, kleine Saugnäpfe halten erstaunliche Lasten, enorme Gewichte schweben auf Luftkissen usw. Das hohe Energiepotential des Luftdrucks entzaubert das Phänomen Fliegen weil bereits kleinste Druckunterschiede auf entsprechenden Flächen hohe Kräfte bewirken können.

Druck an sich kann nur dann Kräfte weitergeben, wenn Druckunterschiede vorhanden sind. Befindet sich eine Abschottung zwischen den Bereichen verschiedenen Luftdrucks, so wirken Kräfte auf diese Abschottung (Kolben, Wand, Flügel...). Luftdruck wirkt in allen Richtungen aber immer rechtwinkelig zur Oberfläche eines Körpers/Wand,

Wenn man sagt „etwas wird angesaugt“ dann meint man, dass der Unterdruck (Sog) zieht. Luftdruck kann aber nur drücken - nicht ziehen. Der gegenüber liegende höhere Druck arbeitet gegen den niederen Druck, das Resultierende bestimmt Richtung und Kraft. Viele Darstellungen die den Sog über dem Flügelprofil mit Kraftpfeilen vom Profilrücken ausgehend zeigen, sind somit physikalisch nicht korrekt. Auch im Unterdruck herrscht Luftdruck, nur eben weniger. Unterdruck ist noch lange kein Vakuum. Somit hat das Wort Vakuum in unserm Themenbereich nichts verloren, auch wenn es umgangssprachlich all zu häufig gebraucht wird.

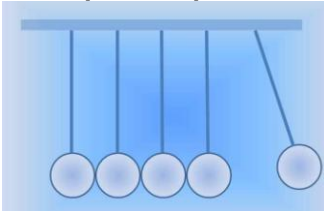
Das Wort "Sog" suggeriert die Vorstellung, dass Luftdruck aktiv ziehen kann. Auch wenn Jeder glaubt zu wissen was gemeint ist, so gibt es keinen Grund diese grundsätzlich irreführende Vorstellung zu vertreten.

In der Pneumatik ist das wohl bekannt, in der Vergasertechnik ebenfalls weshalb für eine hohe Kolbenfüllung bei 4-Taktern mit Turbos oder Kompressoren nachgeholfen wird – "saugen" allein, also der nachschießende, mit Trägheit behaftete äußere Luftdruck, schafft keine 100%ige Kolbenfüllung.

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Der Impuls / Impulsfluss



Graphik: Kugelstoßpendel

Im „allgemeinen“ statischen Luftdruck beschleunigt ein bewegter Flügel Luft nach unten - jetzt wird's dynamisch. Diese Impulse / Stöße werden an die Luft und in ihr weiter gegeben, Impulsfluss genannt. Wegen der Eigenschaft der Kompressibilität und Viskosität der Luft bilden sich dadurch Bereiche verschiedenen Luftdrucks rund um den Verursacher (Flügel/Tragfläche/Schirm...) aus.

Ein in Bewegung befindlicher angestellter Flügel beschleunigt Luft nach unten (Dynamik, Impuls, Stoß, Impulsfluß) was zu Druckunterschieden zwischen Flügelunter- und Oberseite führt. Der höhere Druck arbeitet in Richtung niederen Drucks. Der Druckunterschied, bezogen auf die Flügelfläche, bestimmt die Stärke der Kraft.

Das trifft nicht nur auf den Flügel zu, im Prinzip auf alle Körper wie z.B. den Rumpf sofern ein gewisser Anstellwinkel gegenüber der Flugbahn vorliegt. Ohne Anstellwinkel keine Druckunterschiede, ohne Druckunterschiede keine resultierende Kraft. Die newtonschen Gesetze, Axiome genannt, formulieren die Zusammenhänge von Trägheit, Impuls und Reaktion. Jede Aktion bewirkt eine gleich große Reaktion. Daher kann gesagt werden:

Mit dem Reaktionsprinzip, auch Wechselwirkungsprinzip genannt, beschrieben durch das dritte newtonsche Axiom (actio und reactio), kann man den dynamischen Auftrieb im Sinne der klassischen Mechanik erklären.

Begründung:

Ein Flugzeug wird durch eine äußere Kraft (actio) in Bewegung versetzt (reactio). Die dadurch bewirkte Beschleunigung von Luft nach unten (actio) bewirkt verschiedene Druckbereiche (reactio). Luftdruck wird durch die Impulse der Luftmoleküle erzeugt (actio) die eine gegengerichtete Kraft auf den Flügel bewirkt (reactio). Durch den Druckunterschied ergibt sich eine der Schwerkraft entgegen gerichtete Kraft (Auftrieb).

Soweit die Kausalkette. Unter Auftrieb verstehen wir aber nicht nur irgend eine aufwärtsgerichtete Kraft sondern zumindest eine, die stark genug ist, dass man eine akzeptable Sinkrate erreicht. Besser noch einen Horizontalflug oder Steigen (mit Unterstützung von Muskelkraft, Motor, Thermik). Dazu müssen Bedingungen herrschen wie der besprochene Anstellwinkel, die notwendige Geschwindigkeit und Luft mit ihren Eigenschaften. Es muss sich für jeden stabilen Flugzustand ein Gleichgewicht einstellen. Wir könnten in die vorgenannte Kausalkette noch die Bedingungen mit einflechten bzw. diese erweitern, an der Kernaussage würde sich dabei aber nichts ändern:

Das Reaktionsprinzip / das Wechselwirkungsprinzip / actio-reactio ist somit das grundlegende Prinzip bzw. die Ursache des dynamischen Auftriebs.

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel

Durch das Beschleunigen von Luft bilden sich um das Flügelprofil Druckbereiche (höheren und niedrigeren Drucks). Das Bilden und Auflösen ist ein fortlaufender Prozess. Die Druckbereiche entstehen und verorten sich mit der Geschwindigkeit des Fluggeräts. Druckbereiche haben durch die Viskosität der Luft praktisch eine endliche Größe. Beispiel Flügelunterseite: Luftteilchen prallen vom Flügel ab, geben ihren Impuls an Nachbarluftteilchen weiter bis irgendwann die Impulsweiterleitung im Randbereich des "Druckpolsters" vernachlässigbar klein geworden ist.

Immer in Hinblick auf das Wesen des Luftdrucks (Impulse der Luftmoleküle - Impulsfluß - Druckgradient) kann man vereinfacht die Bereiche verschiedenen Luftdrucks in "Druckpolster" (Überdruck), "Druckdefizit" (Unterdruck) und in statischen Luftdruck unterteilen. "Druckpolster" und "Druckdefizit" sind lediglich sprachliche Hilfskonstruktionen um ein plakatives Bild zu haben. Im Besonderen vereinfacht es die Darstellung der Druckverteilung wie in "Rund um's Flügelprofil) geschrieben.



Foto: DLR Wirbelschlepp

Ein Wort zu Zirkulation und Wirbel: Diese kommen beim Fliegen in allen Größen und verschiedenen Ausprägungen vor. Sehr eindrucksvoll sind z.B. die Randwirbel eines Airliners. Zirkulation und Wirbel sind Ausgleichsbewegungen der Luft. Auch turbulente Grenzschichten und Wellenbewegungen/Schwingungen kann man dazu zählen. Sie sind Wirkung und keine Ursache. Sie bilden sich an verschiedenen Stellen. Sie konstruktiv soweit wie möglich zu verringern ist das Ziel (gänzlich verhindern geht nur wenn man nicht fliegt) - ein spannendes weiterführendes Thema.

Durch die praktisch endliche Ausprägung von Druckbereichen (Abflauen der Impulsweitergabe) möchte man meinen, dass Energie verloren ginge, was

natürlich nicht sein kann. Ein geringer Anteil wird in Wärmeenergie umgewandelt, der Luft wird somit Energie in verschiedenen Formen zugeführt (unelastischer Stoß). Der Druckgradient innerhalb der Druckbereiche wird unter "Plausibilitätsprüfung Druckunterschied" ignoriert weil i. B. die Druckverhältnisse auf der Körperoberfläche relevant sind. Ebenfalls wird die Grenzschicht ignoriert. Beides, Druckgradient und Grenzschicht, sind für die Ausbildung der Druckbereiche nicht unwesentlich. Für das generelle Verständnis darf man es aber vorerst vernachlässigen.

Bildliche Darstellungen der Druckverteilung, wie wir sie alle kennen sind nur idealisiert. Sie hängen vom verwendeten Profil, Oberfläche, Anstellwinkel, Geschwindigkeit ... ab. Für uns als Piloten kann der Bodeneffekt ein praktikabler Indikator sein, wie ausgedehnt das "Druckpolster" in seiner Wirksamkeit sein kann. Es ist natürlich noch etwas ausgedehnter aber für den Piloten praktisch kaum mehr relevant.

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Bernoulli und der Energieerhaltungssatz



Foto: Julian Moos

Der Energieerhaltungssatz besagt, dass Energie nicht verloren gehen kann, aber auch nicht aus dem Nichts gewonnen werden kann. Die Bernoulli-Gleichung zeigt auf, dass die Summe der Druckenergie, potentiellen Energie und der kinetischen Energie entlang der Stromröhre konstant ist, also keine Energiezufuhr erfährt.

Aber ohne Energiezufuhr kein Fliegen. Wo kommt die Energie her? Aus der Lageenergie des Flugzeugs, und/oder hoffentlich meistens auch vom Antrieb (Kraftstoff). Beispiel: Start mit vollem Tank, Landung am Startplatz mit leerem Tank, das Fluggerät hat jetzt wieder dieselbe Lageenergie, wo ist die Energie des Treibstoffs geblieben? In der Luft in Form von Wärme, Luftbewegung (Abwind) und, eine spezielle Form der Luftbewegung, in Wirbel.

Zum Einen ist das Fliegen im offenen System Luft nicht mit einer vorne und hinten offenen Röhre direkt vergleichbar und zum Anderen findet beim Fliegen eine Form der Energieübertragung (Beschleunigung von Luftmasse nach unten) auf die Luft statt, was die Bernoulli-Gleichung nicht beinhaltet.

Gepulste Rauchspots im Windkanal zeigen, dass die Luftteilchen, die sich Anfangs zur selben Zeit an der Nasenleiste teilten, nicht zur selben Zeit am Ende treffen. Das zeitgleiche Ankommen der Luftteilchen wird aber gerne benutzt um die "längere Wegstrecke" und die Bernoulli Gleichung anwenden zu können.

Somit ist der Versuch einer verengten Röhre, in dem in der Engstelle ein geringerer Druck herrscht (Venturi-Rohr), am Austritt aber wieder derselbe Energiezustand herrscht, ungeeignet um die wahre Ursache des Auftriebs zu erklären. Bernoulli-Effekte kommen bei der Detailbetrachtung der Druckausgleichsbewegungen partiell um das Flügelprofil vor (Profilnase). Gesamtenergetisch liegt aber vorn und hinter der Stromröhre derselbe Zustand vor.

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Ursache und Wirkung
Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Plausibilitätsprüfung Druckunterschied



Bild: A321 MFS X

Kann das Verdrängen / beschleunigen von Luft und damit das Schaffen von Druckbereichen überhaupt ausreichen, ein Flugzeug in der Luft zu halten oder müssen da nicht doch noch unbekannte Kräfte im Spiel sein, die es aufzudecken gilt?

Wir gehen von einer Druckdifferenz von $\sim 1/300$ bar zwischen Unter- und Oberseite des Flügels und einem Luftdruck von 1000 mbar (hPa) aus. Bei der vielfach angenommenen Druckverteilung von $1/3$ Überdruck von unten und $2/3$ Unterdruck oben wäre das Verhältnis 1001,1 mbar unten ($\sim 1,1$ mbar Überdruck) und 997,8 mbar oben ($\sim 2,2$ mbar Unterdruck). $10200 \text{ kp/m}^2 / 300 \cdot 12 \text{ m}^2 = 408 \text{ kp}$ – ja das

könnte reichen – sehr ambitioniert - vielleicht ein Ultraleicht-Segelflugzeug.

Ein A320 benötigt nicht 3,3 mbar (hPa) sondern je nach Konfiguration eine Druckdifferenz um die 60 hPa. Auch noch nicht so beeindruckend, da die schon gemessenen wetterbedingten Luftdruckschwankungen bis zu 90 hPa betragen können. Tiefdruck-Wetter über dem Flügel, Hochdruck-Wetter unter dem Flügel.

Der Druckgradient innerhalb der Druckbereiche (und damit die Druckverhältnisse, welche direkt auf die Flügeloberfläche wirken) wird hier der Einfachheit vernachlässigt, damit sind diese Rechnungen grobe Vereinfachungen, als Plausibilitätsprüfung jedoch zulässig.

Beim Fliegen entstehen nur in ganz kleinen Bereichen stärkere Über- und Unterdruckbereiche, im Mittel sind sie aber moderat bis gering ausgeprägt. Der Luftdruck kann enorme Kräfte bewirken, sodass mit bereits relativ geringen Druckunterschieden auf entsprechenden Flächen große Kräfte erzeugt werden.

Ursache und Wirkung

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Strömung im Windkanal



Ludwig Prandtl 1904 - 1,5m Wasserversuchs-Kanal Bild: Nachlassverwaltung Uni Göttingen

Das Wortbild „Strömung“ hat sich uns durch x-fache Wiederholung eingeprägt. "Strömung" ist ein legitimer Begriff wenn es z.B. um Segelschiffe, Wasser, Rohrleitungen oder Windkraft geht. Lilienthal verwendete den Begriff Strömung noch nicht, er sprach von "Wind". Ludwig Prandtl soll ihn erstmals in die Luftfahrt eingeführt haben. Als Ingenieur entwickelte er Absauganlagen, als Professor einen Wasserkanal und später einen Windkanal. Möglicherweise nahm das Dilemma der Begriffe hier seinen Anfang.

Der Windkanal ist eine Versuchsanordnung. Darin steht das Objekt, fixiert von Halterungen mit Sensoren. Die Luftmasse wird bewegt.

Die Ergebnisse von Messungen sind ähnlich der Wirklichkeit wenn man allerhand Aufwand betreibt. I. B. geht es um die Reynolds Zahl (Re-Zahl). Ziel ist es, im Windkanal mit verschiedensten Maßnahmen, eine Re-Zahl zu erreichen, wie sie in der Realität vorkommt. Diese beschreibt das Verhältnis der Trägheits- zu den Zähigkeitskräften. Je näher man der angestrebten Re-Zahl kommt, um so realitätsnäher sind die Messergebnisse. Selten werden aus optischen Gründen Rauchfäden eingeblasen, dann sieht man die Bahn der aneinander gereihten Luftteilchen, das Bild einer stationären Strömung (Stromlinien) wird erkennbar.

Das Bild der permanenten Rauchfäden ist nicht die Wirklichkeit beim Fliegen. Solche Rauchfäden sind nicht die Flugbahn eines einzelnen Luftteilchens (welches vertikal abgelenkt wird) sondern sie sind eine Aneinanderreihung von aufeinanderfolgenden Luftteilchen.



Foto: NASA Langley Research Center Windtunnel

In der Strömungslehre werden Stromlinien (Bahn aneinandergereihter Teilchen) als stationäre Strömung bezeichnet. Wenn es keine Strömung gibt (die Luftmasse also nicht in Bewegung gebracht wurde) sondern ein Flügel / Propeller / Rotorblätter in Bewegung gebracht werden, werden die Ausgleichsbewegungen der verdrängten Luftteilchen als instationäre Strömung bezeichnet. Das Wort Strömung um der Strömung willen.

Wenn man am Boden Gegenwind verspürt, dann könnte man an eine Strömung glauben, aber sobald das Flugzeug fliegt ist die TAS für den sicheren Betrieb relevant – unabhängig wie stark der Wind ist. Im Fall, dass ganze Luftmassen sich verschieben, ist das ganze Betrachtungssystem / Inertialsystem in Bewegung und in diesem hat die Luft keine Geschwindigkeit sondern das Fluggerät.

Jeder Pilot weiß, dass er sich mit seinem Luftsportgerät bewegt und die Luft nahezu steht - nicht umgekehrt. Beim realen Fliegen in freier Natur kommt eine Strömung, wie sie Rauchfäden in einem Windkanal suggerieren, nicht vor, erstaunlich, dass diese rationale Erkenntnis im nächsten Atemzug sofort wieder unter geht.

Es geht also um die Wahl des richtigen Inertialsystems. Rauchfäden im Windkanal oder gezeichnete Stromlinien werden aus dem Inertialsystem Messobjekt gesehen (stationäre Strömung).

Um zu verstehen wie sich die Impulse (Luftdruck) am Flügel bemerkbar machen, ist es notwendig, dass man die Luftmasse als Betrachtungssystem wählt. Stromlinien geben nicht die Impulsrichtung wieder. Luftdruck wirkt rechtwinklig auf Flächen.

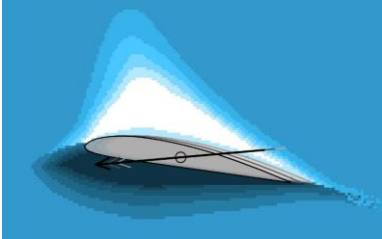
Beim Auftrieb handelt es sich in erster Linie um ein Luftdrucksystem um den Tragflügelquerschnitt. Die Verschiebungen der verdrängten und wieder zusammenfließenden Luftteilchen erfolgen im Wesentlichen vertikal. Das Flugzeug bewegt sich im Wesentlichen horizontal. Der Begriff "Strömung", welche bei Jedem eine Richtung suggeriert die der Körperoberfläche folgt, ist für die reale Bewegung der Luftteilchen irreführend (instationäre Strömung - nur weil man Strömung drauf schreibt ist noch lange keine Strömung drin).

Ursache und Wirkung

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Rund um's Flügelprofil



Idealisierte, überzeichnete Darstellung der Druckverteilung im Normalflug

Durch die Beschleunigung der Luft nach unten, baut sich unter dem Flügel ein nicht symmetrisches "Druckpolster" auf. Die Luftteilchen werden zuerst im vorderen Profilbereich erfasst und nach unten beschleunigt. Sie haben deshalb im weiteren Verlauf der durcheilenden Profilunterseite bereits einen nach unten gerichteten Geschwindigkeitsvektor.

So baut sich vorne ein stärkeres "Druckpolster" auf (auch wegen der Überlagerung mit dem Staudruck). Dieser "Druckpolsterkeil" beeinflusst schon vor dem Flügel die Luft. Im Verlauf der Profilunterseite nimmt das "Druckpolster" ab, hinter dem Flügelprofil „versandet“ es mit einer abwärts gerichteten Komponente.

Wegen des voreilenden "Druckpolsters" werden Luftteilchen schon vor dem Profil nach oben abgelenkt und, unterstützt durch das "Druckdefizit", werden diese über dem Flügel etwas beschleunigt. Durch das abfallende obere Flügelprofil (Profilrückens) bildet sich ein Freiraum. Die vor dem Flügel angehobene Luft, aber vor Allem vom statischen Druck, wird dieser aufgefüllt. Dieses (unvollständige) Auffüllen (verdünnen der oberen Luftmasse - Unterdruck) führt zum "Druckdefizit" über dem Profilrückens. Der Druckgradient ist durch die Raumöffnung relativ groß (auch abhängig von der Form der oberen Profilwölbung) sodass die von oben nachdrückenden (nachschießenden) Luftteilchen am Ende des Profils ebenfalls eine abwärtsgerichtete Komponente haben (Viskosität und Masseträgheit).

Bei optimaler Auslegung von Flügelprofil, Anstellwinkel und Geschwindigkeit (Gleichgewicht) haben sowohl die oberen als auch die unteren Luftteilchen am Ende des Profils einen abwärts gerichteten Vektor. I.B. ist die obere Ausgleichsbewegung der Luftteilchen (nachschießen) noch so energiereich, dass das "Druckpolster" das "Druckdefizit" über die Profilhinterkante noch nicht auffüllen kann.

Die abwärts gerichteten beiden Luftmassen vermischen sich am Ende des Flügels nicht homogen sondern in Form von kleinen Wellen und Wirbeln. Diese relativ kleine Turbulenzschleppe betrifft in erster Linie den Druckausgleich des Profils. Vermischt mit den Randwirbeln der Flügel bleibt eine größere Wirbelschleppe zurück. Diese Wirbelschleppe hinter schweren Luftfahrzeugen ist bekannt und für unsere Luftsportgeräte sehr gefährlich (selbst schon ab der ersten Wake Turbulence Kategorie Light (L)).

Der Auftrieb resultiert also nicht nur aus der Beschleunigung der Luftmasse nach unten sondern erhöht sich in der Wirkung weil oben ein "Druckdefizit" herrscht. Aus der Druckdifferenz entsteht die Kraft auf den Flügel. Unabhängig wie die Druckbereiche in ihrer Ausdehnung sind, so wirken Luftkräfte (Auftrieb, Widerstand...) nur unmittelbar auf die physikalische Oberfläche des Körpers / Flügels / Rumpfs - siehe dazu auch "Druckpolster....".

Ursache und Wirkung

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Stall ohne Strömung



Idealisierte, überzeichnete Darstellung der Druckverteilung beim Auftriebskollaps (stall)

Was wir "Strömungsabriss" (engl. stall) nennen, kann man in Deutsch als "Auftriebskollaps" bezeichnen. So ein "Kollaps" passiert nicht rein zufällig sondern ist neben der Profilierung des Flügelquerschnitts im Wesentlichen vom Anstellwinkel abhängig. Dieser ist bei den meisten Profilen sehr ähnlich (ca. 18°). In der Praxis sagt man dann, dass zu langsam geflogen wurde. Physikalisch gesehen ist es aber zuerst eine Frage des Anstellwinkels.

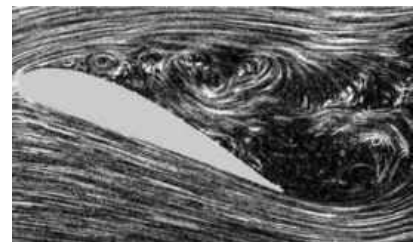
Höherer Anstellwinkel (z.B. ziehen am Steuerknüppel) führt zu mehr Auftrieb und Widerstand aber auch zu geringerer Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit kann der Pilot an seinem Instrument ablesen (auch an den Windgeräuschen hörbar), für ihn ist das die Referenz. Entscheidend ist aber der Winkel gegenüber der Flugbahn. Um das Risiko eines "Kollaps" zu verringern wird daher im Landeanflug bei böigen Bedingungen geraten, etwas schneller (+

halber Spitzenböenwert) anzufliegen.

Anstellwinkelerhöhung bewirkt eine Verschiebung und Intensivierung dieser Druckbereiche nach vorne. Durch weiteres ziehen wird das "Druckpolster" stärker und breitet sich weiter aus. Das "Druckdefizit" nimmt durch den noch stärker abfallenden Profilrücken zu. Auftriebserhöhung und Widerstandserhöhung bei abnehmender Geschwindigkeit sind die normale Folge. Was aber wenn man "überzieht"? Das "Druckpolster" erhöht sich weiter und weitet sich auch hinter das Profilende aus.

Spätestens jetzt müssen wir uns das gegenüberliegende "Druckdefizit" ansehen. Das Auffüllen des Freiraums über dem Profilrücken erfolgt zwangsweise durch die von vorne kommenden aber hauptsächlich durch die von oben nachfließenden Luftteilchen. Diese werden aber durch den zunehmenden größeren Freiraum (starke Verdünnung) immer energieärmer. Richtung und Geschwindigkeit der Luftteilchen wäre gegeben aber er fehlt an Masse - zu geringe Druckenergie am oberen Profilende.

Ist ein bestimmtes Maß an Druckenergie der oberen Luftteilchen unterschritten, dann tritt der "Auftriebskollaps" ein. Der höhere Druck ("Druckpolster") füllt nun von hinten den Freiraum in Form von Wirbeln auf. Die von oben nachfließenden Luftteilchen des "Druckdefizits" sind vergleichsweise zu energieschwach um das zu verhindern - was im Normalflug noch möglich war.



Auftriebskollaps (stall) im Strömungstunnel

Die Druckdifferenz verringert sich durch das Auffüllen deutlich. Das kann je nach Profil schlagartig geschehen, kann aber auch etwas schleichend vonstatten gehen, sodass sich der Auftriebseinbruch für den Piloten bemerkbar macht und er bei sofortigem Nachdrücken wieder einen flugfähigen Zustand herstellen kann (siehe Auftriebsdiagramm entsprechender Profile). Aufgeklebte Wollfäden im Stall-Flugversuch zeigen dieses Auffüllen / Zurückfließen.

Beide Bilder stellen dieselbe Situation dar. Ersteres aus der Sicht der Druckverteilung (i.d.R. unsichtbar), das Zweite mit Rauchfäden im Strömungstunnel (künstlich sichtbar). Die unterschiedlichen Inertialsysteme machen den Unterschied. Die reale Darstellung der verdrängten Luftteilchen könnte man nur in einer Bilderfolge zeigen und unterscheidet sich wieder ganz deutlich. Auftrieb verstehen heißt auch das Unsichtbare verstehen.

Die kontrollierten Stallübungen (Aushungern - langsames ziehen am Steuerknüppel bei ausreichender Höhe) sind i.d.R. nicht wirklich gefährlich wenn keine Trudelneigung vorhanden ist. Bei unkontrollierten Stalls tritt der "Kollaps" i.d.R. einseitig auf, ausgelöst durch Anstellwinkelvergrößerung. Verursacht z.B. durch Turbulenzen (mit aufwärts gerichteter Komponente) in Geschwindigkeitsbereichen nahe am unteren Limit oder im langsamen Kurvenflug, i. B. bei Umkehrkurven in den Wind. Unkontrollierte Stalls gilt es grundsätzlich zu vermeiden, sie sind für uns Normalpiloten mit unseren Luftsportgeräten potentiell lebensgefährlich.

Allgemein gilt: Druckbereiche bilden sich und gleichen sich auch wieder aus, egal in welchem Flugzustand, allerdings darf das Ausgleichen nicht schon auf dem Profilrücken erfolgen. Luftdruck wirkt unmittelbar auf die Profiloberfläche, gleichen sich die Druckbereiche über dem Profil teilweise oder ganz aus, verringert sich die Druckdifferenz. Geringe Druckdifferenz = wenig Auftrieb.

Ursache und Wirkung

Die Entstehung des dynamischen Auftriebs

Aerodynamik / Aerokinetik
Auftrieb versus Gravitation
Fliegen mit Flügeln
Der Luftdruck
Der Impuls / Impulsfluss
Druckpolster, Druckdefizit, Zirkulation, Wirbel
Bernoulli und der Energieerhaltungssatz
Plausibilitätsprüfung Druckunterschied
Strömung im Windkanal
Rund um's Flügelprofil
Stall ohne Strömung
Zusammenfassung

Zusammenfassung

Um die Natur zu verstehen, bedarf es keiner Mathematik sondern eines physikalischen Verständnisses. Impuls und Stoß versteht man sofort, wenn es um feste Körper wie das Newton-Pendel geht. Anders, wenn es um Fluids (Flüssigkeiten und Gase) geht, das kann man nicht gleich sehen - es ist aber das gleiche Prinzip.



Foto: NASA Endeavour landing at KSC

Luft hat ein enormes inneres Energiepotential. D.h. wenn es ermöglicht wird, dass lokale Luftdruckunterschiede erzeugt werden, welche durch eine Abschottung (Flügel) voneinander getrennt sind, dann können, enorme Kräfte auf die Abschottung (Flügel) einwirken. Wenn, bezogen auf die Bewegungsrichtung angestellte Körper/Flügel Luft nach unten beschleunigen (Impuls), dann bilden sich Bereiche verschiedenen Luftdrucks aus. Überdruck unten ("Druckpolster"), Unterdruck oben ("Druckdefizit"). Luftdruckkräfte werden nur von der Seite des höheren Drucks weiter gegeben (Luft kann nicht "saugen" - nur drücken). Dem auf die Flügelunterseite wirkende höheren Druck steht der auf der Flügeloberseite geringere Druck gegenüber (Druckdifferenz), sodass eine aufwärtsgerichtete Kraft, die Auftriebskraft, entsteht.

Das "Druckdefizit" wird nicht von einer Strömung gebildet die durch die längere Laufstrecke des Profilrückens bedingt wäre. Das "Druckdefizit" bildet sich im

Wesentlichen durch die geometrische Raumöffnung des angestellten Flügels (Anstellwinkel). In der kurzen Zeit des Durcheilens (Fluggeschwindigkeit und Trägheit/Viskosität der Luft) kann sich die Raumöffnung nicht vollständig (Defizit) auffüllen. Ein Flügel bzw. ein Flügelquerschnitt ist optimiert um die benötigten Druckbereiche am effektivsten zu schaffen und ein beherrschbares Flugverhalten zu erreichen.

Ein Fluggerät bewegt sich, die Luft steht im Wesentlichen. Beim Beschleunigen von Luft (Anstellwinkel) wird diese hauptsächlich nach unten und oben (vertikal) abgelenkt und fließt nach dem Durcheilen des Flügels auch gleich wieder zurück. Strömung suggeriert eine Bewegung der Luft entlang der Körperoberfläche (horizontal), die es beim Fliegen so nicht gibt. Bei der Betrachtung von Stromlinien wird das Inertialsystem des Körpers genommen, nicht das der Luft.

Es ist irreführend, bei der Erklärung des dynamischen Auftriebs die Begriffe wie Bernoulli, Zirkulation oder andere Phänomene, als Ursache zu bezeichnen - sie sind nur Effekte und nicht im Sinne der klassischen Mechanik ursächlich. Um nicht zu verwirren sollten diese Begriffe bei Erklärungsversuchen besser erst gar nicht erwähnt werden.

Vor allem empfiehlt es sich aber, das aus der Fluidodynamik stammende allgemeine Wort "Strömung", nicht zu verwenden wenn man vom dynamischen Auftrieb spricht. Der Kunstgriff "instationäre Strömung" wird zwar auf die Bewegung der verdrängten Luftteilchen am Anfang der Bewegung angewandt, jedoch nicht auf den eigentlichen Flugzustand.

Da Druck mit den Impulsen der Luftmoleküle definiert werden kann, kann man die physikalische Ursache des Auftriebs zusammenfassend mit dem Reaktionsgesetz erklären (actio-reactio), welches Newton schon definiert hat.