

Warum fliegt ein Flugzeug?

Die übliche Antwort auf diese Frage «weil es Flügel hat» ist sicher korrekt, aber sehr oberflächlich und unvollständig. Welche Rolle spielt die Luft, wie bewegt sie sich um die Flügel herum und welches Profil müssen diese haben? Was ist die Rolle des Höhenleitwerks? Wie muss der Anströmwinkel gewählt werden?

Der Erstflug der Gebrüder Wright

Der erste Hüpfen am 17. Dezember 1903 in North Carolina (USA) dauerte 12 Sekunden über eine Flugstrecke von 36 Metern. Wilbur Wright konnte dem Doppeldecker im Laufschrift folgen und seinem auf dem unteren Flügel liegenden Bruder Orville bei Bedarf helfen, das Flugzeug waagrecht zu halten. Den Antrieb besorgte ein Vierzylinder-Ottomotor, den die Beiden im Eigenbau herstellten. Über Ketten wurde das Drehmoment auf zwei gegenläufige Zweiblatt-Propeller übertragen, die hinter den Tragflächen angebracht waren. Als Höhenleitwerk dienten zwei verstellbare Platten an der Vorderseite des Flugzeuges.

Der Flugapparat war aus einer Weiterentwicklung von Modelldrachen hervorgegangen und das einleuchtende Prinzip für die Erzeugung eines Auftriebes war eine schräg gegen den Luftzug angestellte Platte. Allerdings haben die Gebrüder Wright die Vorteile von nach oben gewölbten Flügelprofilen erkannt und angewendet. Statt einer Schnur wie beim Drachen sorgte der Propellerantrieb für den entspre-

chenden Schub. Erfahrungen mit Drachen zeigen, dass zur Erreichung genügender vertikaler Auftriebskräfte A relativ grosse horizontale Widerstandskräfte W auftreten. Auf ein Flugzeug übertragen ergeben sich folgende Bedingungen für einen nicht beschleunigten, geradlinigen und horizontalen Reiseflug: Der Schub S des Antriebsmotors muss gleich dem Luftwiderstand W und der Auftrieb A muss gleich dem Gewicht G sein.

Ineffizienter Papierflieger

Als einfachsten Fall betrachten wir vorerst einen Papierflieger, der nur Sinkflüge ausführen kann. Seine Geschwindigkeitskomponenten seien in horizontaler Richtung v und in vertikaler Richtung w . Bei einem gleichmässigen Sinkflug sind beide Grössen konstant und die vom Luftwiderstand verbrauchte Leistung $W \times v$ wird durch die vom Gravitationsfeld gewonnene Leistung $G \times w$ kompensiert. Es gilt also der Zusammenhang $G/W = v/w$. Das Geschwindigkeitsverhältnis v/w wird Gleitzahl genannt und gibt an, wie weit das Flugzeug pro Meter Höhenverlust fliegen kann.

Beim Papierflieger ist die Gleitzahl nahe bei 1, beim Space Shuttle im Endanflug bei etwa 4,5. Segelflugzeuge haben Gleitzahlen über 25 und erreichen sogar 70. Basierend auf dem Flugweg, den Kapitän Sullenberger nach dem Ausfall beider Triebwerke seines Airbus A-320 gewählt hat, habe ich die mittlere Gleitzahl auf etwa 18 geschätzt. Er wasserte am 15. Januar 2009 meisterhaft im Hudson River mitten in New York, alle 155 Leute überlebten!

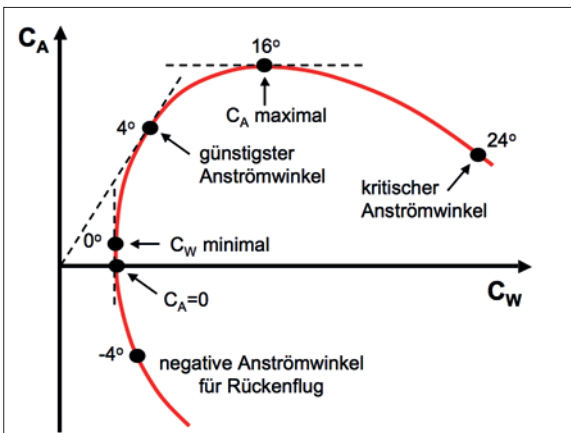


Abb. 1: Das C_A - C_W -Polardiagramm zeigt den Zusammenhang zwischen Auftrieb und Luftwiderstand für ein typisches Flügelprofil in dimensionsloser Form. Um die realen Werte zu erhalten, muss mit $\frac{1}{2} \rho v^2 F$ multipliziert werden (ρ = Luftdichte, v = Anströmgeschwindigkeit, F = Flügelfläche). Als Parameter ist der Anströmwinkel α so eingetragen, dass 0° dem minimalen Luftwiderstand entspricht. Die gestrichelt eingezeichnete Tangente an die Polare ist in diesem Punkt vertikal. Weitere Erläuterungen im Text.

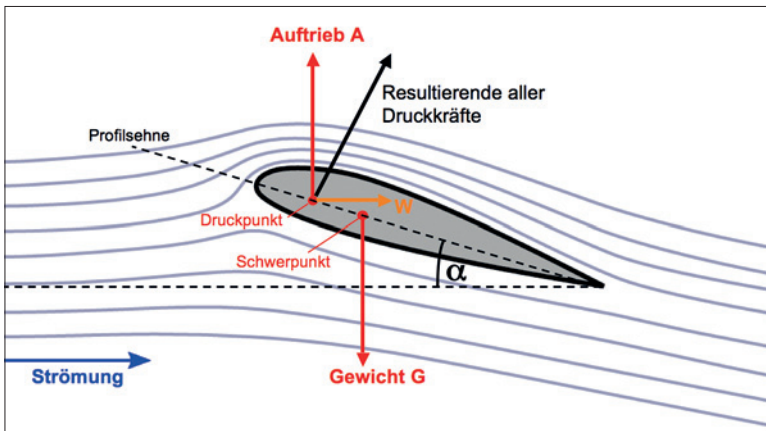


Abb. 2: Stromlinienfeld um einen senkrecht zur Zeichenebene stehenden Flügel. W ist der Strömungswiderstand und α ist der Anströmwinkel, der mit 30° stark übertrieben gezeichnet wurde, um die Grafik deutlicher zu gestalten. Im Reiseflug wäre α rund zehnmal kleiner.

Effiziente Flügelprofile

Die obigen Überlegungen zeigen, dass in erster Linie versucht werden muss, den Luftwiderstand W so klein wie möglich zu machen, damit die Gleitzahl gross wird. Dies ist gleichbedeutend mit einem grossen Verhältnis von Auftrieb A ($=G$) zu Widerstand W ($=S$ für Reiseflug) oder anders formuliert, von Transportkapazität zu Treibstoffverbrauch.

Die Flugzeugbauer beziehen die Grössen A und W auf den Staudruck und die Flügelfläche und nennen die so entstehenden dimensionslosen Zahlen C_A und C_W . Das in Abb. 1 dargestellte C_A - C_W -Polardigramm zeigt den typischen Verlauf der beiden Kennzahlen. Der Anströmwinkel α kann bei Flugzeugen durch das am Heck platzierte Höhenleitwerk eingestellt werden. So können alle Punkte des Polardigramms durch den Piloten angesteuert werden.

Wichtige Punkte in diesem Diagramm sind der minimale Luftwiderstand, bei welchem der Anströmwinkel α als Null definiert wird (vertikale Tangente an die Kurve). Bei einem leicht negativen α ist $C_A=0$ (kein Auftrieb). Der günstigste Anströmwinkel ist gegeben durch diejenige Tangente an die Kurve, die durch den Nullpunkt geht. Das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand (C_A/C_W) ist dort am grössten, beim gezeigten Beispiel also bei $\alpha = 4^\circ$. C_A/C_W ist an diesem Punkt gleich der besten Gleitzahl.

Die energieoptimale Reisegeschwindigkeit liegt bei einem Punkt, der zwischen dem minimalen Luftwiderstand und dem günstigsten Anströmwinkel liegt. Der maximale Auftrieb wird bei einem wesentlich grösseren Anströmwinkel erreicht (horizontale Tangente an die Kurve), bei dem auch der Widerstand deutlich grösser ist. Dieser Punkt bestimmt die minimale Geschwindigkeit beim Horizontalflug.

Der nachfolgende nach rechts abfallende Ast ist nahe der Minimalgeschwindigkeit gefährlich, da der Auftrieb abfällt und gleichzeitig der Luftwiderstand anwächst bis schliesslich bei einem kritischen Wert des Anströmwinkels die Strömung «abreist». Bei diesem abrupten Vorgang wird die über dem Flügel normalerweise laminare Strömung turbulent: Der Auftrieb kollabiert und das Flugzeug ist nicht mehr steuerbar. Dies kann geschehen, wenn ein Pilot zu langsam fliegt, den zu kleinen Auftrieb mit einer Vergrösserung des Anströmwinkels zu kompensieren versucht und dabei unbemerkt den Punkt mit maximalem Auftrieb überschreitet. Das C_A - C_W -Polardigramm wird jeweils gemäss dem Anforderungsprofil des Flugzeugs optimiert.

Die Aufgabe des Höhenleitwerks

Das klassische nach oben gewölbte Flügelprofil hat eine unangenehme destabilisierende Eigenschaft: Der Ansatzpunkt der Resultierenden aller Druckkräfte (Druckpunkt, vgl. Abb. 2) verschiebt sich mit zunehmendem Anströmwinkel weiter nach vorne. Da dieser Ansatzpunkt vor dem Schwerpunkt des Flügels liegt, entsteht ein Drehmoment, das die Flugzeugnase nach oben drückt. Dadurch vergrössert sich der Anströmwinkel weiter und verschiebt den Ansatzpunkt noch weiter nach vorne, was wiederum das Drehmoment verstärkt. Um diese Rückkopplung, die letztlich zu einem Strömungsabriss führt, zu vermeiden, stabilisiert das Höhenleitwerk im Heck des Flugzeuges den Anströmwinkel automatisch. Es ist so angebracht, dass es im Reiseflug weder Auf- noch Abtrieb erzeugt.

Vergrössert sich der Anströmwinkel, senkt sich das Heck ab und der Anströmwinkel wird auch



Abb. 3: Eine A330 der Avianca startet mit deutlicher Kondensationsbildung in Bogotá. In der Unterdruckzone oberhalb der Flügel kühlt sich die Luft zufolge der Ausdehnung ab und der kondensierende Wasserdampf macht die Unterdruckzone sichtbar. Dieses Bild wurde dank hoher relativer Luftfeuchte mit entsprechend kleinem Sättigungsdefizit möglich.

beim Höhenleitwerk grösser. Dadurch nimmt sein Auftrieb zu, das Heck wird angehoben und das Flugzeug in die korrekte Fluglage zurückkorrigiert. Das Umgekehrte geschieht, sobald sich die Nase des Flugzeuges absenkt. Das Höhenleitwerk stabilisiert also automatisch die Reisefluglage. Soll für Steig-, Sink- oder Landeanflug eine andere Fluglage eingestellt werden, kann das Höhenleitwerk mittels Klappen so verändert werden, dass es die neutrale Lage beim gewünschten Anströmwinkel einnimmt. Nebenbei sei bemerkt, dass auch der Rumpf des Flugzeuges näherungsweise Flügelform hat und zum Auftrieb beiträgt.

Bedingungen an Flügelprofile

Unter gewissen Vereinfachungen lässt sich die zweidimensionale Strömung um ein Flügelprofil herum mit Bleistift und Papier berechnen. Das Ergebnis erlaubt, eine allgemeine Bedingung für Auftrieb für jedes Flügelprofil mathematisch zu formulieren (Auftriebsformel von Kutta-Joukowski: Integral längs eines geschlossenen Weges um den Flügel herum). Ein qualitatives Verständnis dieser mathematischen Beziehung erhält man mit Hilfe des Bernoullischen Gesetzes, das im Rahmen der Vereinfachungen längs jeder Stromlinie gültig ist:

$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{potenzielle Energie} + \text{kinetische Energie}$
= konstant längs Stromlinie.

Analog wie im Falle einer Wurfparabel (ohne Luftreibung), wo die Summe von potenzieller und kinetischer Energie längs der Flugbahn einer Punktmasse konstant bleibt, sagt auch das Bernoullische Gesetz, dass die Summe von potenzieller und kinetischer Energie eines gedachten Luftpaketes längs einer Stromlinie konstant bleibt. Die Viskosität der Luft (Luftreibung) wird in dieser vereinfachten Überlegung vernachlässigt, weshalb nur Stromlinien betrachtet werden sollten, die der Flügeloberfläche nicht zu nahe kommen. Der Luftdruck p ist die potenzielle und $\frac{1}{2} \rho v^2$ die kinetische Energie pro Volumeneinheit des betrachteten Luftpaketes.

Ist die Oberseite eines Flügels nach oben gebogen, haben die Luftteilchen oberhalb des Flügels einen längeren Weg als die sich längs der nahezu geraden Unterseite bewegenden Luftteilchen. Deren Geschwindigkeit oberhalb des Flügels ist deshalb grösser als unterhalb des Flügels. Daraus folgt nach dem Bernoullischen Gesetz, dass der Luftdruck oberhalb des Flügels kleiner ist als unterhalb, wo v und p sich nur wenig verändern. Das klassische Flügelprofil erzeugt also einen Unterdruck oberhalb des Flügels (vgl. Abb. 3). Die aus dem Druckfeld rund um den Flügel resultierende Kraft auf den Flügel kann in eine nach oben zeigende Komponente (Auftrieb A) und in eine nach hinten zeigende Komponente (Strömungswiderstand W) zerlegt werden. Der Strömungswiderstand kann nicht vermieden werden, weil die stumpfe Seite des Profils vorne ist und einen Staudruck verursacht.

Das klassische nach oben gebogene Flügelprofil ist optimiert für kleinsten Strömungswiderstand beim Reiseflug. Für Start und Landung werden bei den meisten Flugzeugen Auftriebshilfen (auch Landeklappen genannt) an der Hinterkante der Flügel ausgefahren. Beim Start generieren nur teilweise aktivierte Auftriebshilfen durch eine Vergrößerung der Flügelfläche zusätzlichen Auftrieb. Bei der Landung wird mit voll ausgefahrenen Landeklappen eine verstärkte Wölbung der Flügel erreicht, was sowohl den Auftrieb weiter verstärkt und gewollt auch erheblichen Widerstand erzeugt. Dies kann qualitativ verstanden werden durch eine Umlenkung der Luftströmung nach unten, die eine Kraft senkrecht auf die Landeklappen erzeugt, die schräg nach oben (Auftrieb) und hinten (Widerstand) zeigt.

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.