

Auftrieb, Längsstabilität, Thermik: Alles eine Frage der Masse

Lob und Dank der Masse. Auch wenn wir die Schwerkraft manchmal am liebsten ausschalten möchten, nur die Schwere und Trägheit der Luft ermöglichen uns das Fliegen. Die Masse macht's.

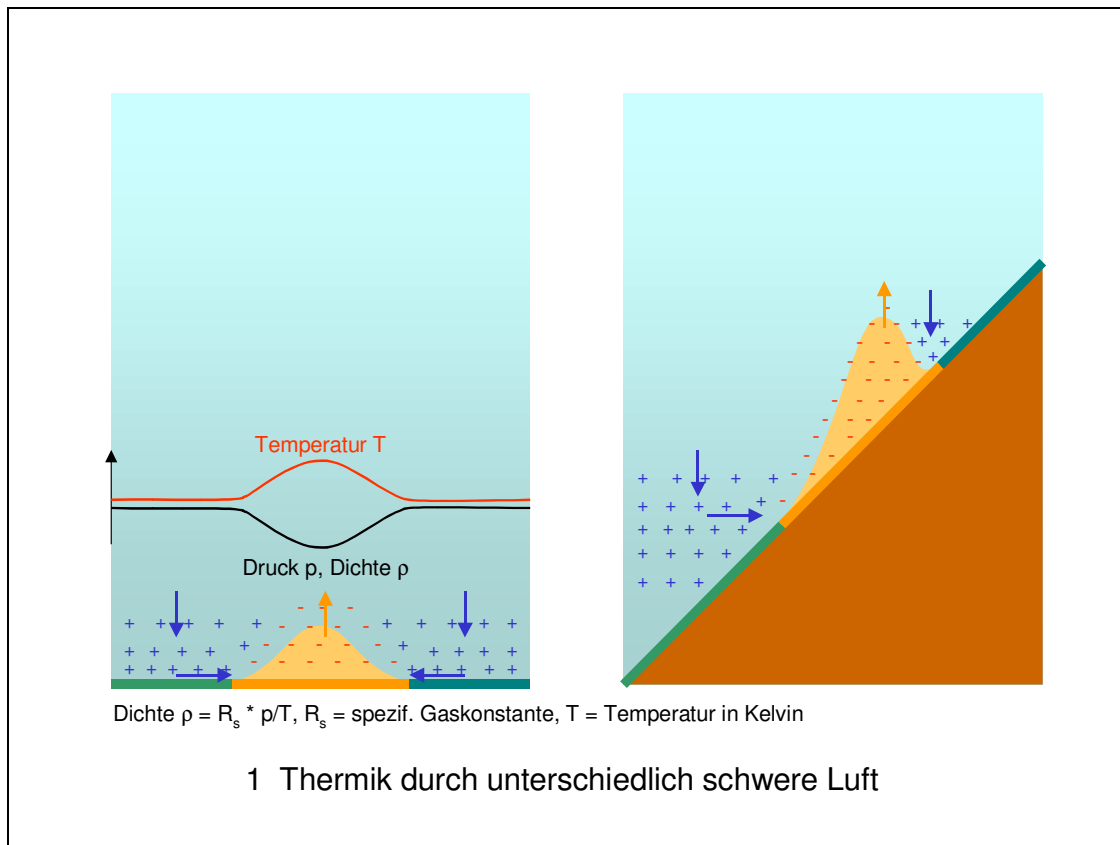
Nicht nur, dass wir ohne Erdanziehung aufgrund der Erdmasse von der Erde 'fielen', und es ohne die Massenanziehung nicht einmal den Klumpen Erde gäbe, es gäbe auch keine Lufthülle, durch die wir gleiten könnten. Und gäbe es ein solches Fluid, ohne Schwerkraft würde es darin weder Thermik geben, noch würde ein Flugzeug längstabil ausgerichtet hindurch gezogen, und ohne die Trägheit der Luftmasse würde es dabei auch keinen Auftrieb erfahren.

Bernhard Wienand, April 2015

Inhalt	Seite
1 Lufthülle und Thermik.....	1
2 Stabiler Gleitflug durch Schwerkraft und Luftkraft.....	2
3 Auftrieb durch die Massenträgheit der Luft.....	4

1 Lufthülle und Thermik

Auch die Luft wird aufgrund ihrer Masse durch die Masse der Erde angezogen. Dadurch lastet auf der Erde ein Luftgewicht bzw. ein Luftdruck p , der auf Meereshöhe durchschnittlich etwa $p = 10.000 \text{ N/m}^2$ bzw. Pa (Pascal) beträgt. Das entspricht dem Gewicht einer Masse von gut $1.000 \text{ kg/m}^2 = 1 \text{ Tonne/m}^2$. Die Dichte der Luft ergibt sich aus der Gasgleichung $\rho = R_s \cdot p/T$ (R_s = spezif. Gaskonstante, T = Temperatur in Kelvin). Sie beträgt auf Meereshöhe bei 15 Grad C etwa $1,225 \text{ kg/m}^3$. Mit der Höhe nimmt der Luftdruck ab, da eine immer weniger hohe verbleibende Luftschicht auf der unteren lastet. Etwa alle 5,5 km halbiert er sich. Die Dichte nimmt etwas weniger ab, da auch die Temperatur mit der Höhe abnimmt.



Thermik entsteht durch kleine begrenzte Gebiete der Erdoberfläche, die wärmer sind als ihre Umgebung (griechisch 'thermos' = warm). Durch Kontakt mit warmen Oberflächen wird auch die Luft erwärmt, so dass ihre Masse m bzw. Dichte $\rho = m/V$ (Masse pro Volumen) abnimmt. In der kühleren Umgebung mit dichter bzw. schwererer Luft herrscht so am Boden ein etwas höherer Luftdruck, so dass dort kühle Luft in den wärmeren Bereich drängt und die warme Luft anhebt, siehe **Bild 1**, links. Die warme Luft steigt dann so lange auf, wie sie leichter als ihre Umgebungsluft bleibt, also ihre Dichte geringer bleibt (statischer Auftrieb nach Archimedes). Dies hängt vor allem davon ab, ob und wie stark die Lufttemperatur mit der Höhe abnimmt.

Nun ist es aber so, dass die kühleren Umgebungsluft, wenn sie sich am Boden unter die wärmere Luft schiebt, von der dort wärmeren Erdoberfläche ebenfalls erwärmt wird. Dies erhöht zwar die Menge an wärmerer Luft, verhindert oder verzögert aber deren Ablösung. Zu einer thermischen Ablösung kommt es meist erst, wenn noch andere Bedingungen erfüllt sind oder noch andere Ereignisse eintreten. So kann sich z.B. kühlerer Luft an einem Hang leichter unter warme Luft schieben und Thermik auslösen, siehe **Bild 1**, rechts, oder die Erwärmung des Bodens durch die Sonne wird durch den Schatten einer Wolke unterbunden, so dass sich unter der vorher erwärmten Luft die Luft abkühlt. Oder die über einem trockenen Stoppelfeld erwärmte leichte Luft wird über die kühle schwere Luft über einer Wiese geweht etc. Und erst wenn eine Warmluftblase abhebt und Fahrt aufnimmt, zieht sie einen Luftschweif nach (Tischtuchthermik), der dann einen spürbaren Bodenwind (Ablösung) erzeugt.

2 Stabiler Gleitflug durch Schwerkraft und Luftkraft

Ohne die Erdanziehung könnten wir zwar schwerelos über der Erde schweben, doch erst durch die Schwerkraft, die uns zur Erde zieht, erfahren wir eine Bewegung, jedenfalls ohne einen sonstigen Antrieb.

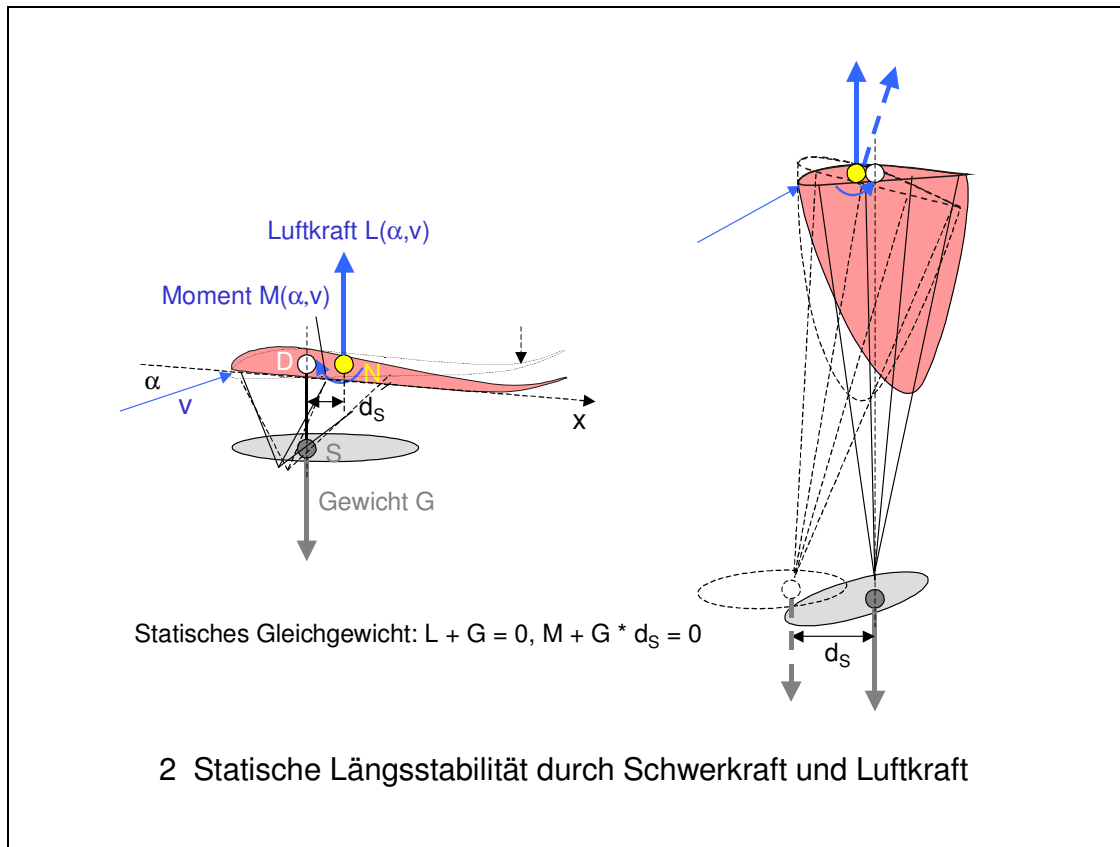
Ein durch die Luft bewegter Körper drängt die Luft zur Seite und schiebt und zieht Luft mit sich. Aufgrund der Massenträgheit der Luft wirkt auf die Oberfläche des Körpers so eine Luftkraft. Die seitliche Verdrängung erzeugt eine Kraftkomponente quer zur Flugbahn. Bei einer überwiegend nach unten umgelenkten Luftmasse entsteht Auftrieb, siehe folgendes Kapitel. Das Mitnehmen von Luftmasse (aufgrund der Form des Körpers und aufgrund der Wandreibung) erzeugt eine Kraftkomponente gegen die Bewegungsrichtung, den Widerstand.

Je nachdem, wo ich den Körper dabei halte bzw. führe, will sich dieser in eine Richtung bzw. Lage (Anstellwinkel) drehen. Man spürt ein Drehmoment M . Lässt man die Drehung zu, so dreht sich der Körper so weit, bis das Drehmoment verschwindet. Ein Haltepunkt, in dem man kein Drehmoment, sondern nur den Druck der Luftkraft spürt, wird Druckpunkt D genannt.

Ein Gleiter wird von der Schwerkraft durch die Luft bewegt. Dabei richtet er sich so aus, dass die Luftkraft hinter und/oder über dem Schwerpunkt S , dem Angriffspunkt der Schwerkraft, angreift, siehe **Bild 2**. Dann hält ein Gleiter von sich aus, ohne ein Eingreifen des Piloten, eine gewünschte Soll-Fluglage (Trimmflug) bzw. ein gewünschter Anstellwinkel ein. Bei Abweichungen vom Soll, z.B. durch Turbulenzen, entstehen Rückstellmomente, die den Gleiter wieder in die Soll-Fluglage drehen. Der Gleiter fliegt statisch längsstabil bzw. nick-stabil. Die Tragflächen sollen im Trimmflug so gegenüber der Anströmung angestellt sind, dass möglichst viel Auftrieb im Verhältnis zum Widerstand entsteht, so dass sich ein flacher Gleitflug oder minimales Sinken ergibt.

Als Angriffspunkt der Luftkraft gilt der Neutralpunkt N . Er liegt bei flacher Anströmung, die überwiegend Auftrieb erzeugt und so zu einem flachen Gleitflug führt, bei etwa $1/4$ der Flächentiefe im Flächenschwerpunkt einer Halbfläche, unabhängig vom Anstellwinkel α (daher der Begriff 'Neutralpunkt'). Nur bei stumpfer Anströmung, bei der eine Fläche fast nur Widerstand erzeugt, liegt der Neutralpunkt weiter hinten, etwa im Flächenschwerpunkt.

Um für einen flachen Gleitflug eine Fluglage mit optimalem Anstellwinkel der Tragflächen zu erreichen, muss ein Flugzeug eine hinten hochgestellte bzw. negativer eingestellte Fläche (Leitfläche) haben. So ergibt sich ein genügend großer Anstellwinkel α und mit zunehmender Geschwindigkeit v ein aufrichtendes Moment $M(\alpha, v)$, welches schließlich das kopflastige Moment $G \cdot d_s$ aus dem Gewicht G und der Schwerpunktvorlage d_s (und aus der nach oben gewölbten Fläche (Profil)) ausgleicht, siehe **Bild 2**, links. Sonst käme es zu einem stabilen Sturzflug. Im Trimmflug ist das Moment im Schwerpunkt null, Druckpunkt und Schwerpunkt liegen übereinander.



Die hinten hochgestellte Fläche ist bei einem Rumpfflugzeug das Höhenleitwerk (Heck-, Höhenflosse). Bei einem nach hinten gepfeilten und geschränkten Nurfügel, wie dem Drachen, sind es die hinten liegenden Außenflügel. Außerdem kann auch die Hinterkante des Flügels etwas nach oben gezogen werden, was zu dem sogenannten S-Schlag-Profil führt.

Bei Drachen mit flexiblen Flügeln (Flexiblen) sorgen Schränkungsanschlüsse (Swivel, Sprogs) oder/und eine Turm-Segelabspannung für eine Mindestschränkung. Die Schränkung, bei Flexiblen die Mindestschränkung, gilt daher als sekundäres Konstruktionsmerkmal für die Nick-Stabilität eines Drachens.

Da die Rückstellmomente umso stärker sind, je weiter der Schwerpunkt vor dem Neutralpunkt liegt, gilt diese Schwerpunktvorlage als primäres Konstruktionsmerkmal und Maß für Nick-Stabilität eines Flugzeugs. Mit abnehmender Schwerpunktvorlage neigt ein Flugzeug dazu, sich zu überschlagen oder ins Trudeln zu geraten.

Beim Gleitschirm mit dem etwa 8 m unter der Tragfläche (Kappe) hängenden Piloten wird Nick-Stabilität durch tiefe Schwerpunktlage erreicht (Pendelstabilität), siehe **Bild 2**, rechts. Dadurch wird weder eine Leitfläche noch ein S-Schlag-Profil benötigt. Auch muss der Schwerpunkt nicht vor dem Neutralpunkt liegen. Da der Widerstand des tief hängenden Piloten von ca. 10 N bei 36 km/h (im Bild vernachlässigt) zu einem gewissen kopflastigen Moment führt (ca. -80 Nm), und wenn auch das Gleitschirmprofil mit einem Null-Auftrieb-Moment-Beiwert von z.B. $c_{M,A=0} = 0,02$ ein leichtes kopflastiges Moment erzeugt (ca. -60 Nm), liegen Druckpunkt und Schwerpunkt im Trimmflug bei einer Pilotenmasse von z.B. 90 kg sogar etwas hinter dem Neutralpunkt (gut 15 cm).

Eine zu weit hinten angreifende Schwerkraft führt aber auch beim Gleitschirm zum Sackflug, zum Trudeln oder zu einer Rückwärtsbewegung der Kappe. Dies kann z.B. dann passieren, wenn die Bremsleinen zu stark gezogen bzw. belastet werden.

Im Trimmflug ist der Pilot über meist 3 bis 4 Punkte über die Flügeltiefe so aufgehängt, dass die Kappe bei losen Bremsleinen für optimales Gleiten angestellt ist. Dann ist der Abstand d_s zwischen Schwerpunkt und Druckpunkt null. Ein höherer Anstellwinkel ist mit einem nach vorne geschwenkten Piloten verbunden, was einer Verschiebung des Schwerpunkts nach vorne entspricht und zu dem gewünschten kopflastigen Rückstellmoment führt. Bei einem kleineren Anstellwinkel ist es umgekehrt.

Allerdings treten bei dieser Pendelstabilität unschöne Nebeneffekte auf. Bei einem größer werdenden Anstellwinkel erhöht sich neben dem Auftrieb auch der Widerstand der Kappe, sie bremst. Und wenn die Wirkungslinie des Pilotengewichtes (noch) hinter dem Neutralpunkt verläuft, erhöht sich auch das Moment aus der Kappe, es wird weniger negativ oder gar positiv. Beides trägt dazu bei, dass der Pilot nach vorne pendelt und den Anstellwinkel der Kappe weiter erhöht. Erst wenn der Pilot weit nach vorne gependelt ist, kommt es zu einem kopflastigen Rückstellmoment, das dann entsprechend kräftig ausfällt. Dies kann die Kappe vorschießen lassen, sofern der Pilot nicht bremsend eingreift. Ein Vorschießen würde den Piloten anschließend wieder nach vorne pendeln lassen. Die Trimmfluglage würde erst nach einem Einschwingvorgang wieder eingenommen. Auf ein Unterschreiten des Soll-Anstellwinkels reagiert ein Gleitschirm schwächer. Bei negativen Anströmwindeln besteht die Gefahr, dass der Schirm von der Anströmkannte her einklappt.

3 Auftrieb durch die Massenträgheit der Luft

Masse widersetzt sich einer Veränderung ihrer Geschwindigkeit, ihres Geschwindigkeitsvektors, sei es eine Beschleunigung, eine Verzögerung oder eine Veränderung der Bewegungsrichtung, wie z.B. eine Umlenkung zur Seite, was als Massenträgheit bezeichnet wird.

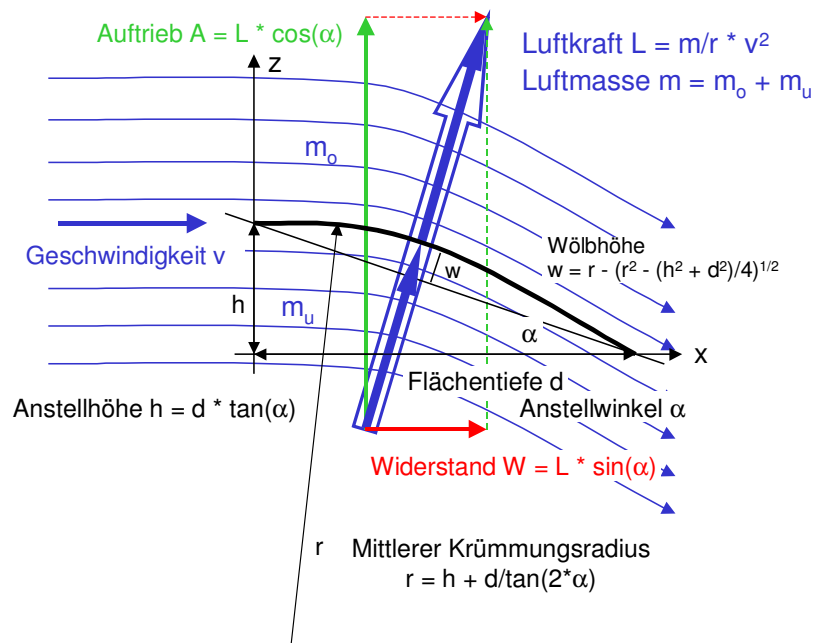
Eine uns geläufige Kraft, die auf der Massenträgheit beruht und auch den dynamischen Auftrieb bewirkt, ist die Fliehkraft bzw. Zentrifugalkraft $Z = m \cdot v^2/r$, z.B. in einer Zentrifuge. Sie entsteht, wenn eine Masse m mit der Geschwindigkeit v auf einer Kreisbahn mit dem Radius r gehalten und damit ständig zu einer Änderung ihrer Bewegungsrichtung gezwungen wird.

Wird wie im **Bild 3** ein Luftstrom von einer gewölbten Fläche mit dem konstanten Krümmungsradius r umgelenkt, wirkt auf die umgelenkte Luftmasse $m = m_u + m_o$ und damit auf die Fläche die Zentrifugalkraft Z als Luftkraft $L = m/r \cdot v^2$. Unten drückt die Luftmasse m_u gegen die Fläche, oben zieht die Masse m_o an der Fläche. Dass auch oben der Massenstrom der Wölbung der Fläche folgt, wo er an der Fläche zieht, liegt wesentlich an dem umgebenden Luftdruck (auf Meereshöhe gut 1 Tonne/m²), der beidseitig die Strömung andrückt. Hinzu kommt die Adhäsion (lateinisch 'adhaesio' = Anhaftung) zwischen der Luft und der Fläche.

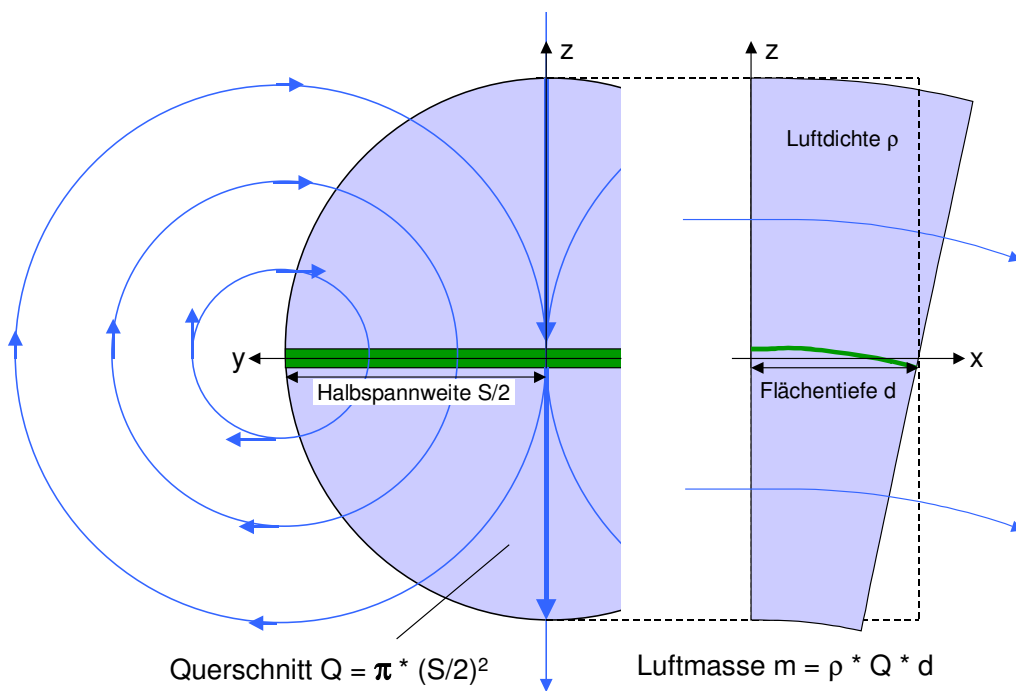
Bei tangentialer Anströmung ergibt sich der mittlere bzw. konstante Krümmungsradius aus dem Anstellwinkel α und der Flächentiefe d : $r = h + d/\tan(2 \cdot \alpha)$ mit der Anstellhöhe $h = d \cdot \tan(\alpha)$, bzw. $r = d \cdot (\tan(\alpha) + 1/\tan(2 \cdot \alpha))$. Die umgelenkte Luftmasse erhält man aus der Luftdichte ρ , der Flächentiefe d und einem Strömungsquerschnitt Q : $m = \rho \cdot d \cdot Q$. Welcher Querschnitt für die umgelenkte Luft maßgeblich ist, ist abzuschätzen. Dabei sind die beiden folgenden Punkte zu berücksichtigen:

1. Die Umlenkung der Luft nimmt mit dem Abstand von der Fläche ab.
2. Die unten gegen die Fläche drückende Luft drückt auch Luft zur Seite, nach außen, die oben an der Fläche ziehende Luft zieht auch Luft von der Seite an, von außen.

Für Q wird daher eine Ellipse mit der Spannweite S als Durchmesser angenommen, für übliche Anstellwinkel und Spannweiten ein Kreis mit $Q = \pi \cdot (S/2)^2$, siehe **Bild 4**. Diese Annahme wird auch durch plausible Rechenergebnisse gerechtfertigt. Die Luftkraft wird also maßgeblich von der Spannweite bzw. Streckung beeinflusst. Der elliptische bzw. kreisförmige Strömungsquerschnitt führt zu einer elliptischen Auftriebsverteilung über der Spannweite.



3 Luftkraft L als Zentrifugalkraft der umgelenkten Luftmasse m



4 Querschnitt Q und Masse m der umgelenkten Luft

Der mit dem Anstellwinkel α nach hinten zeigende Luftkraftvektor \underline{L} lässt sich in eine Komponente senkrecht zur Strömungsrichtung, den Auftrieb $A = L \cdot \cos(\alpha)$, und in eine Komponente in Strömungsrichtung, den Widerstand $W = L \cdot \sin(\alpha)$, zerlegen. Die Gleitzahl ist dann $Glz = A/W = 1/\tan(\alpha)$. Sie nimmt mit kleinerem Anstellwinkel zu (wobei auch die Luftkraft L

abnimmt). Der mit dem Auftrieb verbundene Widerstand wird 'Induzierter Widerstand' (lateinisch 'inducere' = herbeiführen) genannt, im Unterschied zum Reibungswiderstand aus Scherkräften im Strömungsfeld, insbesondere in der Grenzschicht. Der Begriff wurde aufgrund von Analogien zwischen Strömungsfeldern und elektromagnetischen Feldern (Induktion) vmtl. durch Hermann von Helmholtz ca. 1873 eingeführt.

Schon mit diesem einfachen Zentrifugalkraft-Modell, das noch keine Wechselwirkung zwischen Druck und Geschwindigkeit, siehe unten, keinen Reibungswiderstand und keine weiteren Effekte (z.B. Ablösungen) und Einflussgrößen (z.B. Pfeilung) berücksichtigt, lassen sich bereits recht plausible Werte berechnen. So ergibt sich z.B. für einen Flügel mit einer Spannweite von 10 m und einer Fläche von 14 m^2 (Streckung 7,14) bei einem Anstellwinkel von 3 Grad, einer Geschwindigkeit von 11 m/s bzw. 40 km/h und einer Luftdichte von $1,225 \text{ kg/m}^3$ eine Luftkraft $L = 125 \text{ kp}$ und eine Gleitzahl $Glz = 19$. Erhöht man die Spannweite bei gleicher Fläche von 10 auf 12 m (Streckung 10,29), so genügt für eine gleich große Luftkraft $L = 125 \text{ kp}$ bereits ein Anstellwinkel von 2,1 Grad, mit dem man eine Gleitzahl $Glz = 27$ erreicht.

Die Zentrifugalkraft ergibt sich aus dem Impulssatz, mit dem sonst auf einem anderen Wege die Luftkraft berechnet wird. Der Impuls ist $I = m \cdot v$, die Kraft $K = dI/dt$, z.B. $K = m \cdot dv/dt$.

Die unten gegen die Fläche drückende Luft drückt aber nicht nur auch Luft zur Seite, nach außen, wie für den Strömungsquerschnitt Q berücksichtigt, siehe oben, sondern auch noch nach vorne und nach hinten, so dass die Strömung unter der Fläche vor dem Überdruckgebiet gebremst und dahinter wieder beschleunigt wird. Die oben an der Fläche ziehende Luft zieht nicht nur auch Luft von der Seite an, von außen, sondern auch noch von vorne und von hinten, so dass die Strömung über der Fläche vor dem Unterdruckgebiet beschleunigt und dahinter wieder gebremst wird.

Dadurch strömt bei Unterschall-Geschwindigkeit auch Luft aus dem Überdruckgebiet unter der Fläche um ihre vordere Kante, die Anströmkante, herum in das Unterdruckgebiet über der Fläche. An einer scharfen Anströmkante, also einer Kante mit einem sehr kleinen Krümmungsradius, wie z.B. bei einer einfachen Platte, entsteht so eine extrem starke Sogspitze, die die wandnahe Luft (Grenzschicht) gegen die Strömung anzieht, so dass sich hinter der Kante ein flacher Wirbel bildet, der die Umströmung von der Wand drängt, ablöst. Dies hat zu der runden Anströmkante bzw. Profilnase geführt, die solche frühen Ablösungen verhindert bzw. reduziert, und daraus weiter zur 'Stromlinienform' bzw. 'Tropfenform'. Eine Umströmung einer angestellten bzw. gewölbten Platte wie in Bild 3 kann es also physikalisch bei Unterschall-Geschwindigkeit so nicht geben. Für eine genauere Bestimmung der Luftkraft aus umgelenkter Luftmasse muss folglich die Umströmung eines Profils betrachtet werden.