

Über den dynamischen Auftrieb

Der nachstehende Beitrag soll auf kurze, korrekte Weise erklären, wie ein Flugzeugflügel so viel Auftrieb erzeugt, dass er ein Flugzeug trägt.

Als Gründe für den Auftrieb werden gern „Das Gesetz von Bernoulli“ oder „Die Zirkulation“ genannt. Das trifft aber ebenso wenig zu, wie das „Das Gesetz von Newton“ den berühmten Apfel vom Baum fallen lässt. Immerhin wird der Auftrieb nicht mehr damit erklärt, dass die Luft an der Oberseite eines Flugzeugflügels einen längeren Weg als auf der Unterseite zurücklegt, oder dass die Luftmoleküle an der Unterseite des Flügels „abprallen“. Was bewirkt aber tatsächlich den Auftrieb, und wieso kann er ein Flugzeug in der Luft halten?

Strömt ein Fluid (Wasser oder Luft) durch einen gekrümmten Kanal, entsteht eine Kraftwirkung zur Außenseite der Krümmung hin. Der Physiker Isaac Newton (1643 - 1727) hat erkannt, dass diese Kraft F sich aus der Masse \dot{m} des strömenden Fluids, multipliziert mit der sich aus der Richtungsänderung ergebenden Komponente der Strömungsgeschwindigkeit v_a (Abb. 1) ergibt:

$$F \text{ (in N)} = \dot{m} \text{ (in kg/s)} \cdot v_a \text{ (in m/s)} \quad [1]$$

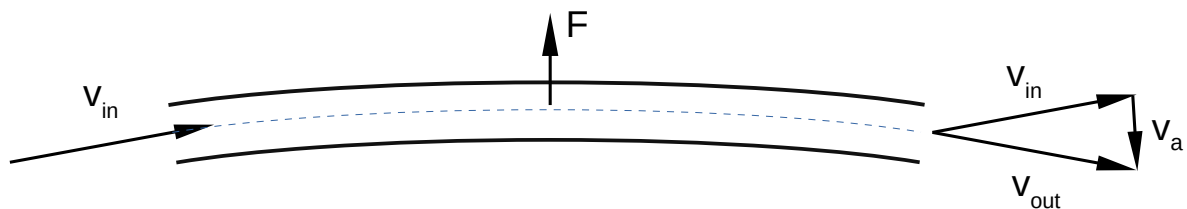


Abb. 1: Kraftwirkung bei Richtungsänderung einer Strömung

Die Teilchen eines Fluids strömen auch dann auf gekrümmten Bahnen, wenn kein Kanal vorhanden ist, sondern nur ein gebogenes „Leitblech“ (Abb. 2). Die Strömung folgt dann dessen Kontur in einem ziemlich weiten Bereich, und zwar umso mehr, je enger sie ihm benachbart ist.

Die oben erwähnten, durch die Bahnkrümmungen bewirkten Kräfte auf die Fluidteilchen führen dazu, dass sich oberhalb des „Leitblechs“ Unterdruck und unterhalb Überdruck aufbaut, so dass auf das Blech, im folgenden „Gekrümmte Platte“ genannt, eine Kraft F ausgeübt wird.

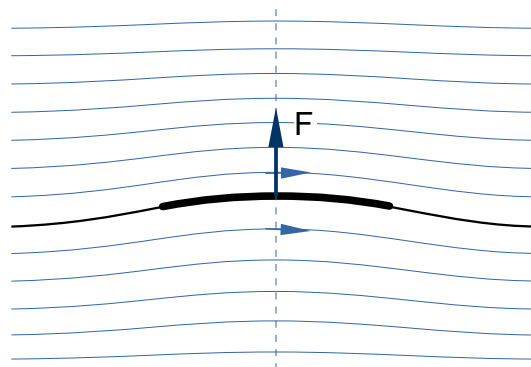


Abb. 2: Stromlinienbild einer gekrümmten Platte (Anstellwinkel $\alpha = 0$)

Physikalisch macht es übrigens keinen Unterschied, ob das Fluid am ruhenden „Leitblech“ vorbei strömt, oder ob sich das „Leitblech“ durch das ruhende Fluid bewegt.

Eine gekrümmte Platte kann durchaus als Tragfläche eines Flugmodells dienen. Die nicht ganz unbekannt Formel für die Auftriebskraft F_a einer Tragfläche lautet:

$$F_a = c_a \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \quad [2]$$

Beteiligt sind demnach ihr so genannter Auftriebsbeiwert c_a , ihr Flächeninhalt A , die Luftdichte ρ sowie die Geschwindigkeit v , mit der die Tragfläche angeströmt wird. Die Geschwindigkeit wirkt dabei „quadratisch“; eine Verdopplung vervierfacht die Auftriebskraft.

Der Auftriebsbeiwert c_a hängt vom so genannten Anstellwinkel, das ist der Winkel, den die Profilsehne mit der Strömungsrichtung bildet, und vom Tragflächenprofil ab. Für die gekrümmte Platte (Abb. 3) gilt, falls der Anstellwinkel α und die Winkel β nicht allzu groß ($< 8^\circ$) sind (nach Peter R. Hakenesch: Aerodynamik der Flugzeuge):

$$c_a = 2 \cdot \pi \cdot (\alpha + \beta/2) \quad [3]$$

Anm.: Die Winkel α und β sind im Bogenmaß einzusetzen ($\alpha_{\text{Bogen}} = \alpha_{\text{Grad}} \cdot \pi/180$)
Das Verhältnis h/t ist ein Maß für die Krümmung ($\beta = 4 \cdot h/t$)

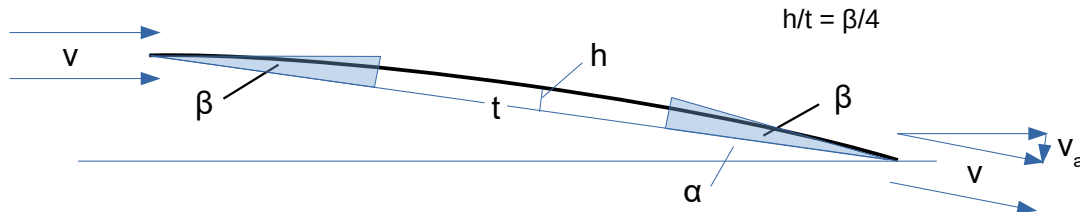


Abb. 3: Gekrümmte Platte

Für die Auftriebskraft der gekrümmten Platte ergibt sich aus [2] und [3]:

$$F_a = 2 \cdot \pi \cdot (\alpha + \beta/2) \cdot A \cdot \rho \cdot v^2/2 \quad [4]$$

Mit dem Anstellwinkel $\alpha = 0$ erhält man die so genannte Nullauftriebs-Kraft:

$$F_{a0} = \pi \cdot \beta \cdot A \cdot \rho \cdot v^2/2 \quad [4.1]$$

und mit $\beta = 0$ ergibt sich die Auftriebskraft für die „ebene Platte“:

$$F_a = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot A \cdot \rho \cdot v^2/2 \quad [4.2]$$

Gleichung [4] lässt sich so umstellen, dass die Auftriebskraft F_a entsprechend Gleichung [1] das Produkt eines Luft-Massenstroms m' und einer vertikalen Strömungskomponente v_a ist:

$$F_a = \underbrace{(\pi \cdot A \cdot \rho \cdot v)}_{m'} \cdot \underbrace{((\alpha + \beta/2) \cdot v)}_{v_a} \quad [5]$$

Demnach beträgt der Massenstrom $m' = \pi \cdot A \cdot \rho \cdot v$, und die Luft strömt an der Hinterkante der gekrümmten Platte unter dem Winkel $\alpha + \beta/2$ mit der Vertikalkomponente $v_a = (\alpha + \beta/2) \cdot v$ ab.

Ein Rechenbeispiel: Eine gekrümmte Platte -die als Teil einer Tragfläche zu denken ist- möge eine Breite $b = 1$ m, eine Tiefe $t = 0,2$ m und eine Krümmung $h/t = 3,5$ % ($\beta = 0,14 = 8^\circ$) haben, und von Luft mit einer Dichte $\rho = 1,225$ kg/m³ unter einem Anstellwinkel $\alpha = 8^\circ = 0,14$ mit einer Geschwindigkeit $v = 15$ m/s angeströmt werden.

Für den Luft-Massenstrom errechnet sich dann aus [5]:

$$m' = 3,14 \cdot 0,2 \text{ m}^2 \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot 15 \text{ m/s} = 11,5 \text{ kg/s}$$

und für die Vertikalkomponente der Geschwindigkeit:

$$v_a = (0,14 + 0,07) \cdot 15 \text{ m/s} = 3,15 \text{ m/s}$$

Die Auftriebskraft beträgt damit lt. [1] bzw. [5]:

$$F_a = 11,5 \text{ kg/s} \cdot 3,15 \text{ m/s} = 36 \text{ N}$$

Ein Luft-Massenstrom von 11,5 kg/s ergibt für den Luft-Volumenstrom:

$$V' = 11,5 \text{ kg/s} / 1,225 \text{ kg/m}^3 = 9,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Bei einer Geschwindigkeit von 15 m/s heisst dies, dass (bei einer Breite von 1 m) Luft in einer vertikalen Ausdehnung von 0,62 m, also etwa der dreifachen „Tragflächen“-Tiefe (t in Abb. 3) erfasst werden muss. Strömungsbilder aus dem Windkanal (Abb. 5 und 8) bestätigen diese weiträumige Beeinflussung.

Eine Variante der gekrümmten Platte besteht darin, dass die Winkel β_v an der Vorderkante und β_h an der Hinterkante verschieden sind. Dann ergibt sich für die Auftriebskraft:

$$F_a = 2 \cdot \pi \cdot (\alpha + \beta_v/8 + 3 \cdot \beta_h/8) \cdot A \cdot \rho \cdot v^2/2 \quad [6]$$

Der Winkel an der Hinterkante beeinflusst den Auftrieb also mehr als der Winkel an der Vorderkante.

Die gekrümmte Platte kann man als „Mutter aller Tragflächen“ bezeichnen. Vergleicht man beispielsweise die Auftriebs-Beiwerte einer gekrümmten Platte, deren Daten der Wölbung eines Tragflügel-Profils entsprechen, mit denen des Profils selbst, dann zeigt sich (Abb. 4), dass sie innerhalb eines bestimmten Anstellwinkel-Bereich praktisch gleich sind.

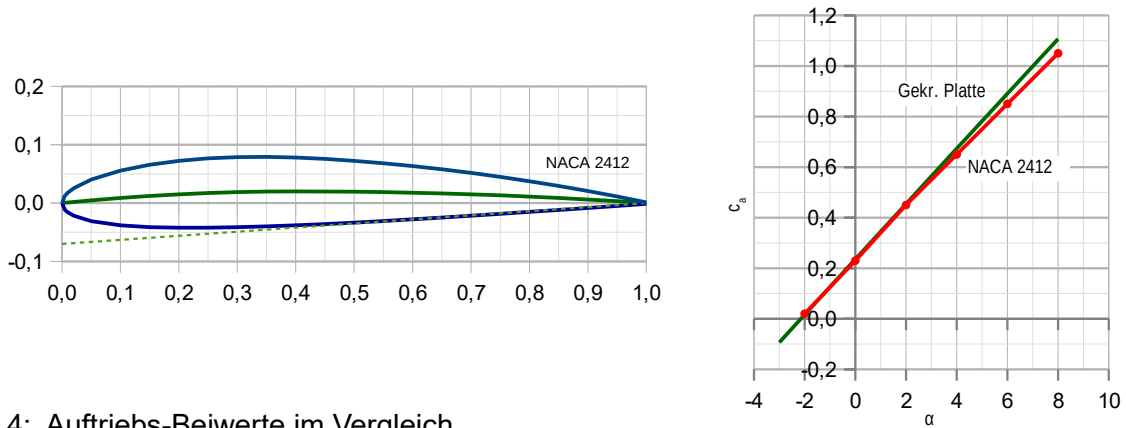


Abb. 4: Auftriebs-Beiwerte im Vergleich

Eine ebene Platte liefert lt. [4.2] ebenfalls Auftrieb, wie die gekrümmten Strömungsbahnen in Abb. 5 zeigen. Sie ist als Tragfläche nur bedingt geeignet, weil sie wenig biegesteif ist. Deshalb beschränkt sich ihr Einsatz außer auf Depron-Modelle mit geringen Spannweiten (Abb. 6) hauptsächlich auf Seiten- und Höhenleitwerke.

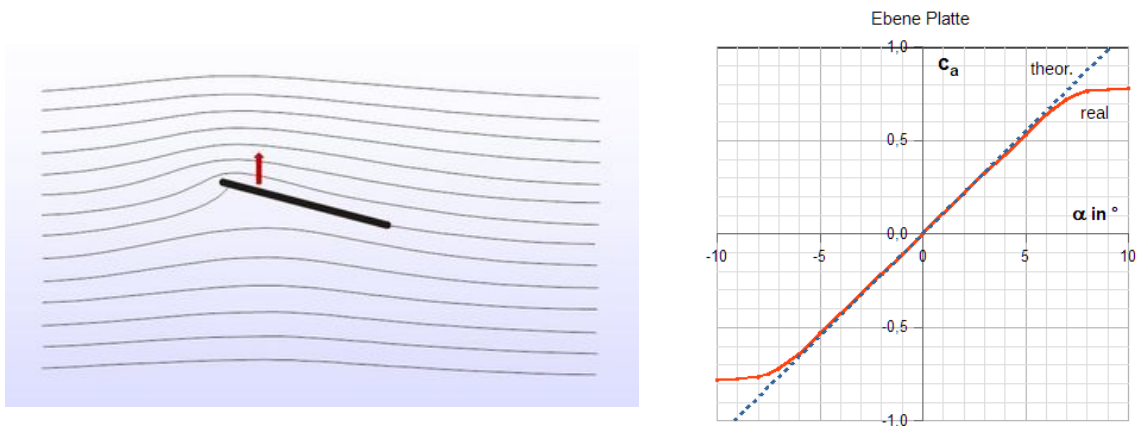


Abb. 5: Stromlinienbild und Auftriebsbeiwert einer ebenen Platte

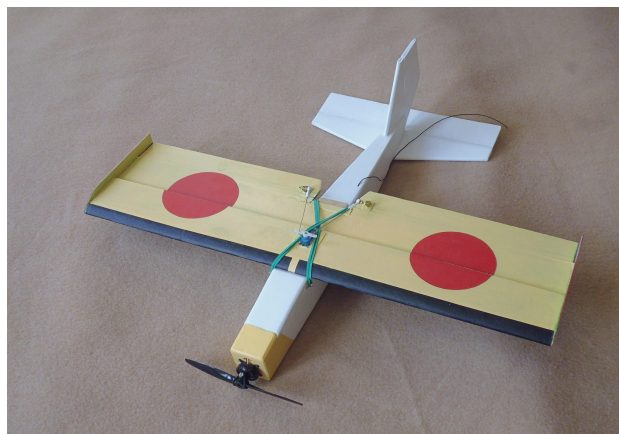


Abb. 6: Depron-Modell (aus Modell-Aviator) mit 600 mm Spannweite

Nachteilig ist ihr relativ hoher Luftwiderstand gegenüber „stromlinienförmigen“ Profilen, deren Widerstands-Beiwerte mit zunehmenden Anstellwinkeln weit weniger ansteigen (Abb. 7).

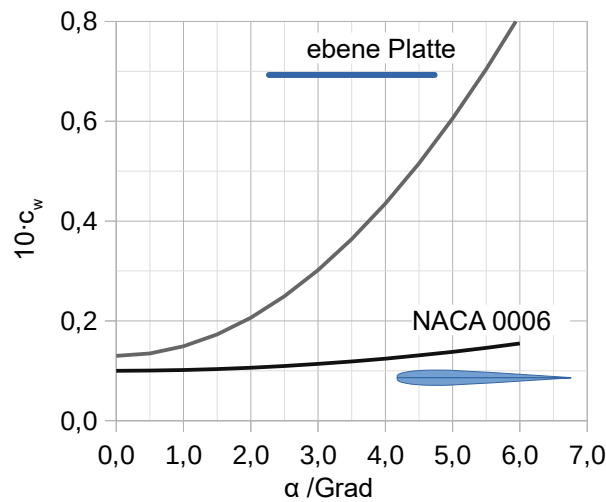


Abb. 7: Widerstands-Beiwerte im Vergleich

Die Animation einer Luftströmung um ein Tragflächen-Profil zeigt im Einzelnen, welche Bahnen die Luftteilchen durchlaufen, wie sie ihre Geschwindigkeit verändern, und in welchem Maß eine Tragfläche den „Luftraum“ beeinflusst.

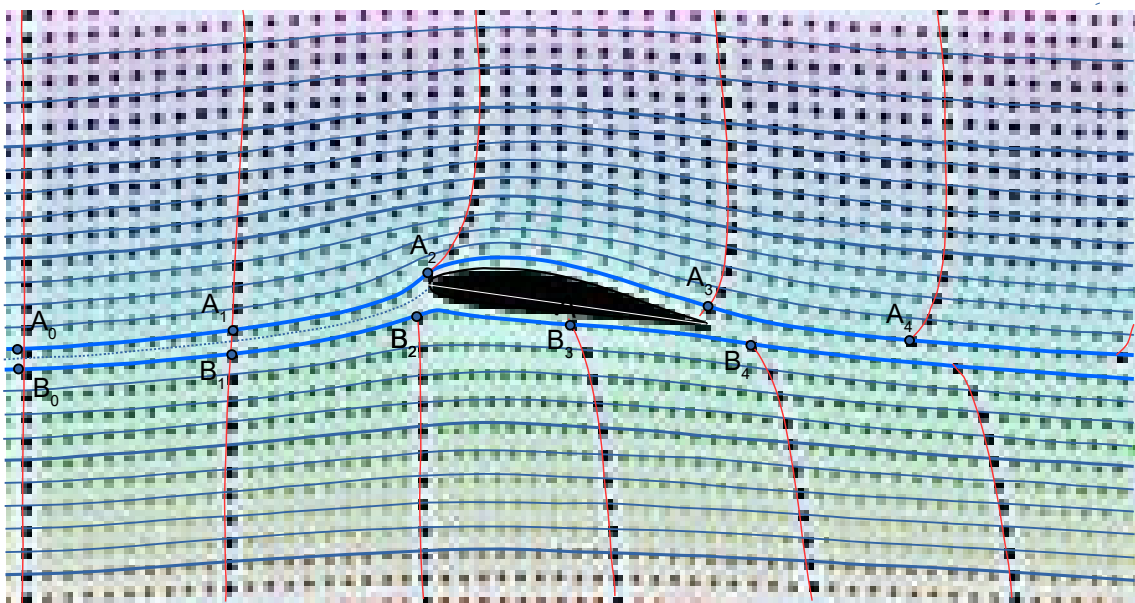


Abb. 8 Momentaufnahme der Luftströmung um ein Tragflächen-Profil (Quelle: Wikipedia)

Zusammenfassung:

Grundsätzlich kommt der dynamische Auftrieb einer Tragfläche dadurch zu Stande, dass sie Luft nach unten ablenkt. Der tiefere Grund für den Auftrieb ist, dass die Luftteilchen gekrümmte Bahnen durchlaufen, wodurch oberhalb der Tragfläche Unterdruck und unterhalb Überdruck entsteht. Die Druckdifferenz bewirkt, dass die Tragfläche -wie der Name sagt- trägt.

Für eine gekrümmte Platte gelten einfache Zusammenhänge zwischen Profil, Anstellwinkel, Flächeninhalt, Luftdichte und Strömungsgeschwindigkeit, und es zeigt sich auch, in welchem Maß die Luftströmung „herangezogen“ wird.