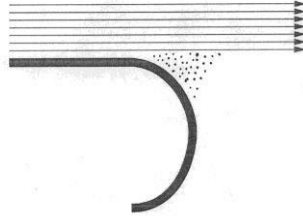


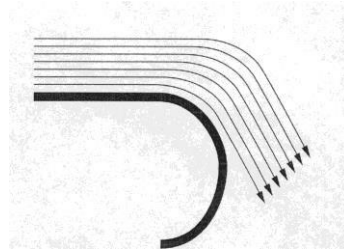
Hilfreiche Bemerkungen zur Behandlung der Flugphysik

1. Rolle der inneren Reibung der Luft

Bekanntlich hatte die Physik lange Zeit Schwierigkeiten, das Fliegen zu verstehen. Wird ein Hindernis von der Luft umströmt, ergibt sich aufgrund der Eulerschen Gleichungen bei reibungsfreier Umströmung die Potenzialströmung, bei der es weder Luftwiderstand noch Auftrieb gibt. Erst lange, nachdem Lilienthal Flugapparate konstruiert und Gleitflüge unternommen hatte, gelang es Prandtl mit der Berücksichtigung der Luftreibung die „Gesunde Umströmung“ eines Tragflächenprofils zu verstehen, die zu Auftrieb und Widerstand führt. Randbedingung ist dabei, dass die Luftströmung entlang leicht gekrümmter Flächen diesen Oberflächen folgt und anliegt. Dieses Phänomen ist bekannt als Coanda Effekt. Die Entstehung des Coanda Effektes habe ich immer wie folgt zu erklären versucht: In der Abbildung links ströme die Luft oberhalb einer gekrümmten Fläche ohne Reibung. Dann können keine Kräfte auf die Luft ausgeübt werden und sie strömt horizontal weiter. Mit Reibung allerdings wird die Luft zwischen Luftstrahl und nach unten geneigter Fläche durch die innere Reibung mitgenommen. Dadurch entsteht ein Unterdruck, der zu einer Umlenkung der Luftströmung führt: rechtes Bild.

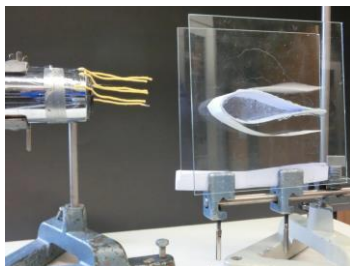


Strömung ohne Reibung

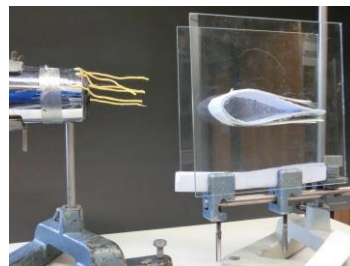


Strömung mit Reibung

Bisher konnte ich mich nur auf diesen Gedankenversuch stützen. Aber er lässt sich auch in der Realität durchführen. Ein symmetrisches Profil in horizontaler Lage wird von vorn angeströmt. Rechts und links wird die Luftströmung durch Glasplatten begrenzt. Um die innere Reibung auszuschalten, wird vorn an der Profilmase ein Papierstreifen angebracht, der die Luft oberhalb und unterhalb trennt. Er flattert in der Luftströmung und folgt nicht mehr der Form des Profils. Schneidet man Schlitz in den Papierstreifen, wird eine Verbindung zwischen der Luft unterhalb und oberhalb des Streifens möglich. Die Luft wird durch Reibung mitgenommen und es entsteht ein Unterdruck. Das Ergebnis ist, dass die Strömung dann an der Profiloberfläche anliegt, wie es das rechte Bild zeigt.



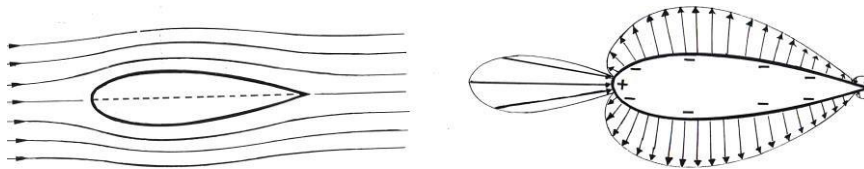
Strömung, Reibung unterbunden



Strömung mit Kontakt und Reibung

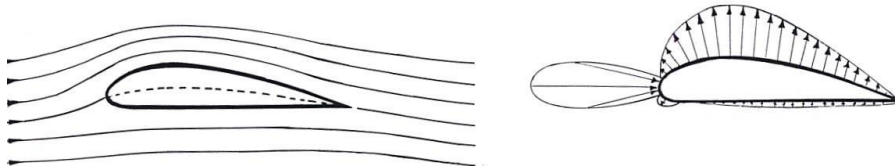
2. Verteilung der Auftriebskraft auf Oberseite und Unterseite der Tragfläche

In Lehrbüchern wird gelegentlich erwähnt, aber nicht erklärt, dass die auf dem Unterdruck beruhende Auftriebskraft an der Oberseite deutlich grösser ist, als die durch den Überdruck bewirkte Auftriebskraft an der Unterseite. Dies lässt erklären, wenn man von einem von vorn angeströmten symmetrischen Profil ausgeht. Die Luftströmung wird durch die Form des Profils erzwungen. An der Profilnase wird die Strömung geteilt und nach oben und unten abgelenkt. An der Profilnase gibt es einen Staudruck. Danach werden über den weit überwiegenden Teil des Profils gekrümmte Stromlinien erzwungen. Das führt, wie an andere Stelle gezeigt und bekannt sein dürfte, zu einem Unterdruck, wenn der Krümmungsmittelpunkt unterhalb der Fläche liegt. Dadurch entsteht an der Tragflügeloberseite ein Unterdruck, und an der Tragflügelunterseite ebenfalls ein Unterdruck. Oben gibt es Auftrieb und unten gibt es Abtrieb. Beide sind gleich. Mit einem Schrägrohrmanometer und einer Scheibensonde lässt sich dies leicht demonstrieren.



Symmetrisches Profil horizontal angeströmt Kraftverteilung über Profilloberfläche

Gehen wir von dem symmetrischen Profil über zu einem Profil mit gerader Unterkante. In diesem Fall entfällt weitgehend der Abtrieb und übrig bleibt der Auftrieb.



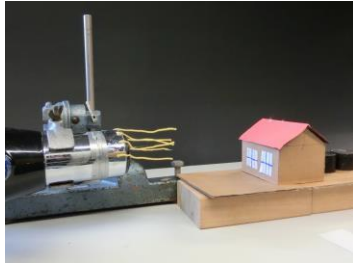
Profil mit gerader Unterseite horizontal angeströmt Kraftverteilung über Profilloberfläche

Erst wenn man das Profil aus der horizontalen Lage in eine übliche Fluglage mit Anstellwinkel überführt, gibt es auch an der unteren Tragflächenseite Auftrieb, der aber immer geringer bleibt als der Auftrieb an der Tragflächenoberseite.

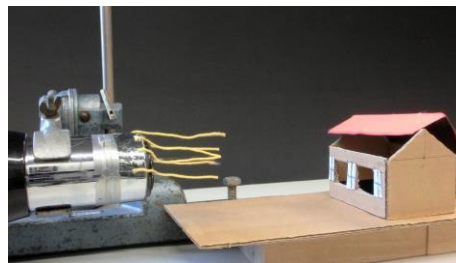
3. Gefährdung von Hausdächern durch Sturm

Wird ein Haus vom Wind umströmt, ergibt sich an der Oberseite wegen der Umlenkung der Strömung ein Unterdruck. In manchen Darstellungen wird allein dieser Unterdruck dafür verantwortlich gemacht, dass bei Sturm Dächer abgedeckt werden können. In Wahrheit hängt es aber vor allem von dem Öffnen bzw. Schließen der Türen und Fenster ab, ob das Dach gefährdet ist. Ein kleines Hausmodell mit beweglichem Dach werde von vorn angeströmt. Sind die dem Wind zugewandten Fenster geöffnet, fliegt das Dach fort. Sind die Türen und Fenster hier geschlossen und die an der anderen Seite befindlichen Fenster

geöffnet, so bleibt das Dach liegen. Daraus ergibt sich die Erklärung nahezu von selbst. Sind Fenster in Windrichtung geöffnet, so breitet sich der Staudruck innerhalb des Hauses aus und wirkt auf das Dach nach außen. Sind auf der dem Wind abgewandten Seite die Fenster offen, breitet sich Unterdruck innerhalb des Hauses aus, und das Dach bleibt liegen.



Fenster vorn geschlossen



Fenster vorn geöffnet

Literatur:

[1] Weltner, K.: Flugphysik um das Fliegen zu verstehen. In: MNU 55/7, S. 388-396, 2002

[2] Tipler, P.; Mosca, G.: Physics for Scientists and engineers 7th Edition

[3] Willi J. G. Bräunling; Grundlagen der Flugzeug-Aerodynamik, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2018