

7.1 Einführung in die Strömungslehre

Fluide

Die Strömungslehre bezeichnet als Fluid (lat.: fluidus „fließend“) eine Substanz, die einer beliebig langsamen Scherung keinen Widerstand entgegensetzt (endliche Viskosität). Der übergeordnete Begriff Fluid für Gase und Flüssigkeiten wird verwendet, weil die meisten physikalischen Gesetze für beide Stoffarten gleichermaßen gelten und sich viele ihrer Eigenschaften nur quantitativ, also in ihren Größenordnungen, aber nicht qualitativ unterscheiden.

Die Strömungslehre oder Strömungsmechanik ist die Lehre des physikalischen Verhaltens von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen).



Strömungslehre beschreibt das Verhalten von Flüssigkeiten, Gasen und Körpern, die sich darin bewegen. Dazu gehört auch ein Schiff, das über das Wasser segelt oder ein Motorrad, das die Luft verdrängt.

Ein Teilgebiet der Strömungslehre ist die Aerodynamik, die speziell das Verhalten von Körpern in Gasen betrachtet, zum Beispiel in der Luft der Atmosphäre. Sie beschreibt unter anderem die Kräfte, die es einem Flugzeug ermöglichen, zu fliegen – bestimmt durch sein Gewicht, den vom Triebwerk erzeugten Schub sowie durch die Kräfte, welche bei der Bewegung an den Teilen des Flugzeugs entstehen.



Die Aerodynamik beschreibt unter anderem die Kräfte, die ein Flugzeug abheben lassen.

Die folgenden Lerneinheiten vermitteln mit zahlreichen Versuchen und Beobachtungsaufgaben die Gesetze der Aerodynamik.

7.2 Dynamischer Auftrieb

Wenn Sie das nächste Mal in einem Auto mitfahren, drehen Sie die Scheibe herunter und halten Sie Ihre Hand aus dem Fenster. Halten Sie Ihre Hand so in den Fahrtwind wie die Tragfläche eines Flugzeugs. Bevor Sie dieses Experiment ausführen, besprechen Sie Ihr Vorgehen bitte mit der Fahrerin bzw. dem Fahrer und den Mitfahrern.

Aufgabe 7.2.1

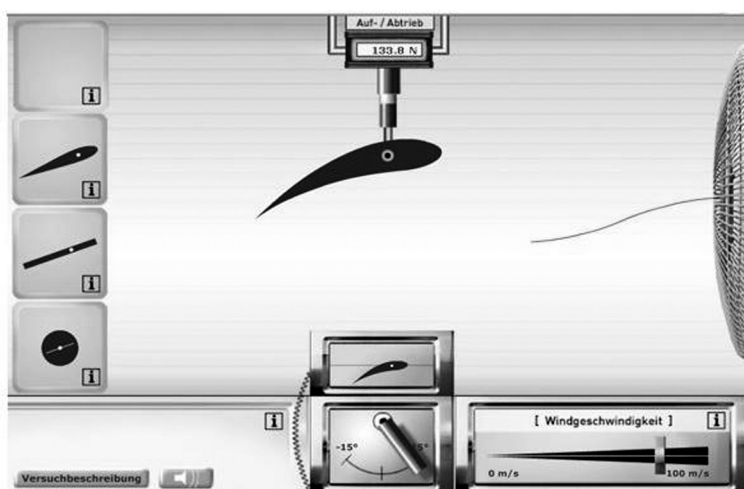
- a| Bei welchem Anstellwinkel Ihrer „Modelltragfläche“ erfährt sie den größten Luftwiderstand?
- b| Bei welchem Anstellwinkel Ihrer „Modelltragfläche“ erfährt sie den größten Auftrieb?

Aufgabe 7.2.2

Der dynamische Auftrieb auf eine Flugzeugtragfläche hängt von dem vertikalen Impuls ab, den die Tragfläche nach unten an die anströmende Luft überträgt. Formulieren Sie im Sinne der Galileischen Methode auf der Basis Ihres bisherigen Wissens Vorhersagen im folgenden Kontext:

- a| Wenn ein Flugzeug glatte Bretter als Tragflächen hätte, hätte es dann auch einen dynamischen Auftrieb?
- b| Erfährt eine Kugel in einer Luftströmung auch einen Auftrieb?
- c| Welchen Auftrieb erwarten Sie bei einer Tragfläche, deren Querschnitt achsensymmetrisch gestaltet ist?

Im Internet finden Sie verschiedene Windkanalsimulationen, z. B. unter: www.planet-schule.de/warum/iegen/themenseiten/t2/s1.html



Windkanalsimulation

Galileische Methode

In der Naturwissenschaft werden auf Basis von Theorien Vorhersagen formuliert, die in Experimenten überprüft werden. Werden die Vorhersagen durch die entsprechenden Experimente verifiziert (bestätigt), dann wächst das Vertrauen in diese Theorie. Werden die Vorhersagen durch diese Experimente falsifiziert (widerlegt), dann besteht Handlungsbedarf. Entweder wird die Theorie auf Spezialfälle eingeschränkt oder die Theorie wird als falsch verworfen. Diese naturwissenschaftliche Arbeitsweise wird auch Galileische Methode genannt.

Tragflächenprofile

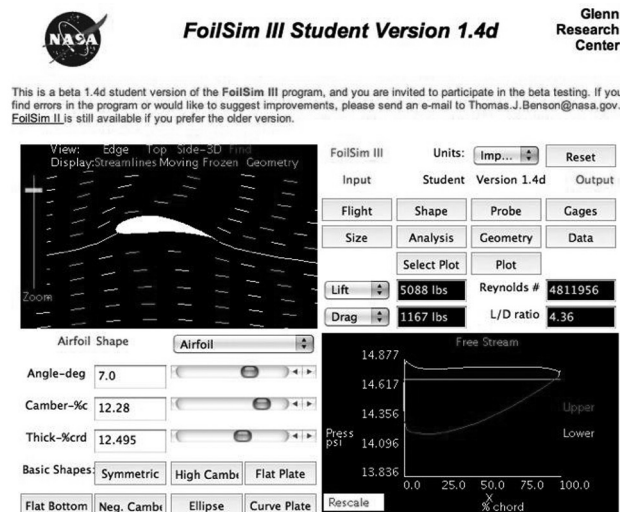
Verkehrsflugzeuge haben unsymmetrische, „geschwungene Tragflächenprofile“. Flugzeuge, die auch auf dem Rücken fliegen können, besitzen andere Tragflächenformen. Mit einem hinreichenden Anstellwinkel der Tragflächen können Flugzeuge, die z. B. für den Kunstflug gebaut werden, auch auf dem Rücken fliegen. In diesem Fall ist ein negativer Auftrieb erforderlich.

Aufgabe 7.2.3

- a| Welche Parameter kann man bei dieser Simulation verändern?
- b| In welcher Weise hängt der dynamische Auftrieb bei der geschwungenen Tragfläche von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Anstellwinkel ab?
- c| Wie unterscheidet sich der Auftrieb auf die symmetrische Tragfläche vom Auftrieb auf die geschwungene Tragfläche?
- d| Untersuchen Sie den Auftrieb bei einer brettförmigen Tragfläche.
- e| Untersuchen Sie den Auftrieb auf eine Kugel bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten.

Virtueller Windkanal

Damit Flugzeugtragflächen an die anströmende Luft einen vertikalen Impuls übertragen können, haben die Tragflächen von Verkehrsflugzeugen einen Anstellwinkel und ein entsprechendes Profil. Wie die Strömung an der Tragfläche anliegt und nach unten abgelenkt wird, kann man in der folgenden Simulation sehen.



Experiment im virtuellen Windkanal unter www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/foil3.html

7.3 Luftwiderstand

Eine Tragfläche lenkt Luft nach unten ab, gleichzeitig erfährt die Tragfläche aber in der Strömung einen Luftwiderstand. Wie bei einem Auto spricht man vom sogenannten Widerstandsbeiwert, auch c_w -Wert genannt. Der c_w -Wert bei einem Auto sagt aus, in welcher Weise der Luftwiderstand von der Form des Autos abhängt – wie windschnittig oder stromlinienförmig es ist. Bei einer Tragfläche ist der c_w -Wert eine Funktion der Form der Tragfläche, dem Tragflächenprofil und dem Anstellwinkel der Tragfläche.



Form, Profil und Anstellwinkel der Tragflächen entscheiden über den Luftwiderstand.

Aufgabe 7.3.1

Leiten Sie die Formel für die Luftwiderstandskraft F_w bei folgenden Randbedingungen ab: Ein Modellkörper (hier als Quader mit der Frontfläche A) bewegt sich mit der Geschwindigkeit v . Gehen Sie davon aus, dass dieses Modellauto die Luft direkt vor dem Auto auf die „Autogeschwindigkeit“ v beschleunigen muss und keine Luft seitlich „abfließt“.

Widerstandsbeiwert

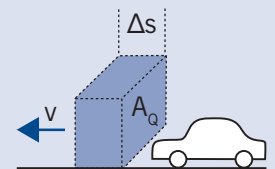
Bestimmt man die Kraft, auch Luftwiderstand genannt, die notwendig ist, um die Luft mit der Dichte ρ vor dem Auto mit der Querschnittsfläche A auf die Geschwindigkeit v zu beschleunigen, ergibt sich folgende Formel:

$$F_{w*} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Wenn wir davon ausgehen, dass der Modellkörper (z. B. ein windschnittiges Auto) die Luft nur teilweise auf die Autogeschwindigkeit beschleunigen muss, und dass ein großer Teil des oben angenommenen Luftvolumens seitlich abströmt, ist die real gemessene Luftwiderstandskraft F_w nur ein Bruchteil von F_{w*} , also:

$$F_{w\text{-real}} = c_w \cdot F_{w*} = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Der Faktor c_w wird Widerstandsbeiwert genannt. Je windschnittiger das Auto ist, umso kleiner ist der Bruchteil der beschleunigten Luft und umso kleiner ist der c_w -Wert des Autos.



Bei der Deduktion der Luftwiderstandskraft bei Fahrzeugen wurde von der „Modellvorstellung“ ausgegangen, dass ein Luftpaket der Querschnittsfläche A und der Tiefe Δs vor dem Auto auf die Geschwindigkeit des Autos beschleunigt wird.

Formelsammlung

$$F = \Delta p / \Delta t$$

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$E = F_s \cdot s$$

$$p = m \cdot v$$

$$\Delta p = m \cdot \Delta v$$

$$\rho = m / V$$

$$V = A \cdot s$$

$$F = m \cdot a$$

$$a = \Delta v / \Delta t$$

c_w -Werte

Motorrad: 0,7

LKW: 0,8

Autos: 0,1 bis 0,5

Flugzeug-Widerstandsbeiwerte

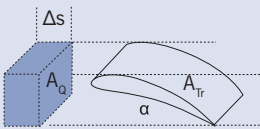
Bei einer Tragfläche ergibt sich die Luftwiderstandskraft nach der Formel:

$$F_{W\text{-real}} = c_W \cdot F_{W*} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Hierbei ist ρ die Dichte der Luft, v die Geschwindigkeit des Flugzeugs gegenüber der umgebenden Luft, A der Flächeninhalt der Tragfläche und c_W der Widerstandsbeiwert der Tragfläche.

Bezugsflächen

Bei der Deduktion der Luftwiderstandskraft bei Landfahrzeugen geht die Querschnittsfläche A in die Luftwiderstandsformel ein.



Bei einer Tragfläche ergibt sich genau die gleiche Luftwiderstandsformel aus analogen Überlegungen. Als Bezugsfläche nimmt man hier aber den Flächeninhalt der Tragfläche.

Aufgabe 7.3.2

- An welcher Stelle in der obigen Luftwiderstandsformel geht die Form der Tragfläche ein?
- Wie ändert sich der Widerstandsbeiwert mit dem Anstellwinkel der Tragfläche?

Auftriebskraft

Misst man in einem Windkanal die Auftriebskraft eines Profils bei konstantem Anstellwinkel, aber unterschiedlichen Parametern (A : Flächeninhalt der Tragfläche, ρ : Dichte der Luft, v : Geschwindigkeit), ergibt sich folgendes Ergebnis:

- $F_A \sim$ zur Luftdichte ρ (bei konstantem A und v)
- $F_A \sim$ zum Flächeninhalt A der Tragfläche (bei konstantem ρ und v)
- $F_A \sim$ zu Quadrat der Geschwindigkeit (bei konstantem ρ und A)

Diese Messergebnisse liefern:

$$F_A \sim \rho \cdot A \cdot v^2$$

In der Literatur wird diese Proportionalität in folgender Form dargestellt:

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot c_A \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Definition

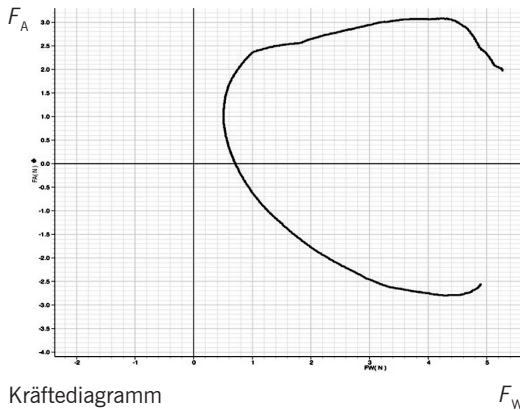
Der Faktor c_A , die Proportionalitätskonstante in dieser Formel, wird Auftriebsbeiwert genannt.

Aufgabe 7.3.3

- Wie ändert sich der Auftriebsbeiwert der Tragfläche, wenn das Flugzeug in einer größeren Höhe fliegt?
- Wie ändert sich der Auftriebsbeiwert der Tragfläche, wenn das Flugzeug mit doppelter Geschwindigkeit fliegt?
- Wie ändert sich der Auftriebsbeiwert mit dem Anstellwinkel der Tragfläche?

7.4 Profilpolare

Wenn man die Auftriebskraft bei unterschiedlichen Anstellwinkeln über der Luftwiderstandskraft aufträgt, ergibt sich das folgende Diagramm. Hierbei beträgt der Flächeninhalt der Tragfläche 100 cm^2 ; die Strömungsgeschwindigkeit ist 18 m/s ; die Luftdichte ist $\rho_{\text{Luft-Dichte}} = 1,2\text{ g/dm}^3$.

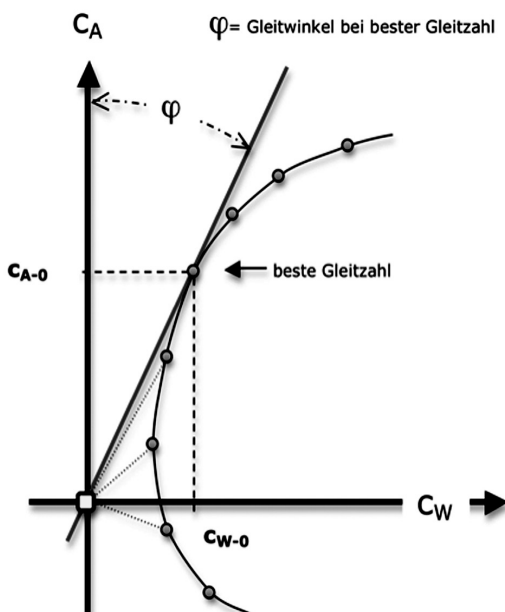


Kräfte-Diagramm

Dieses Kräfte-Diagramm ist von der Geschwindigkeit, der Luftdichte und dem Flächeninhalt der Tragfläche und dem Anstellwinkel abhängig. Berechnet man aus den Messwerten für die Auftriebskraft und die Luftwiderstandskraft die zugehörigen Beiwerte, erhält man ein Diagramm, das nur noch vom Anstellwinkel der Tragfläche und dem Tragflächenprofil im Luftstrom abhängt.

Aufgabe 7.4.1

- Wie kann man aus dem obigen Diagramm, in dem auf der Hochachse die Auftriebskraft (F_A) und auf der Querachse die Luftwiderstandskraft (F_W) abgetragen ist, eine Profilpolare bestimmen?
- Ändert sich das Diagramm „Profilpolare“, wenn man die Messung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten v vornimmt?

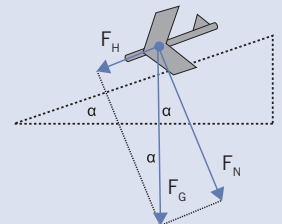


Profilpolare

Kräfte-Diagramm

Das F_W - F_A -Diagramm zeigt, bei welchen Anstellwinkeln man welche Kräfte an den Tragflächen zu erwarten hat. Bei wachsendem Anstellwinkel steigt die Auftriebskraft bei fast gleicher Luftwiderstandskraft steil an. Erhöht man den Anstellwinkel weiter, wächst die Luftwiderstandskraft bei fast gleicher Auftriebskraft. Wird der Anstellwinkel noch weiter erhöht, reißt die Strömung an der Tragfläche ab – die Luft folgt nicht mehr dem Tragflächenprofil.

Gleitwinkel

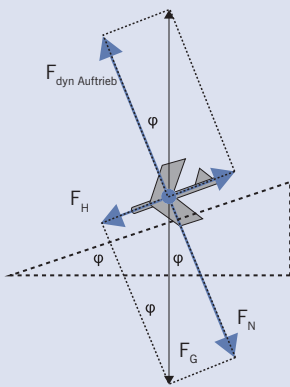


Ein Segelflugzeug ohne Vortrieb und ohne Thermik überwindet den Strömungswiderstand durch die Hangabtriebskraft auf dem Gleitflug längs einer gedachten schiefen Ebene. Unter dem Gleitwinkel versteht man den Winkel dieser Flugbahn zur Horizontalen unter der Bedingung, dass das Segelflugzeug mit konstanter Geschwindigkeit dieser gedachten schiefen Ebene hinab fliegt.

Profilpolare

Unter einer Profilpolaren versteht man ein Diagramm, in dem man den Auftriebsbeiwert c_A einer Tragfläche auf der Hochachse und den Luftwiderstandsbeiwert c_w der Tragfläche auf der Querachse abträgt.

Schiefe Ebene



Die Gewichtskraft F_G kann man in die Hangabtriebskraft F_H und die Normalkraft F_N zerlegen. Wenn das Segelflugzeug ohne Vortrieb mit konstanter Geschwindigkeit fliegt, dann gleicht die dynamische Auftriebskraft $F_{\text{dyn-Auftrieb}}$ genau die Normalkraft aus und die Hangabtriebskraft gleicht gerade die Luftwiderstandskraft aus.

Gleitverhältnis

Unter dem Gleitverhältnis versteht man das Verhältnis $h:l$ mit h = Höhe der schiefen Ebene und l = Länge der schiefen Ebene. Es gilt: $\sin \varphi = h/l$

Aufgabe 7.4.2

Legt man vom Ursprung die Tangente an die Profilpolaren, erhält man einen Berührungspunkt P.

a) Bestimmen Sie $\tan \varphi$ als Funktion von F_H und F_N .

b) Zeigen Sie:

$$\tan \varphi = \frac{F_W}{F_A}$$

c) Leiten Sie $\tan \varphi$ als Funktion des Widerstands- und des Auftriebsleitwertes her. Zeigen Sie:

$$\tan \varphi = \frac{c_W}{c_A}$$

Aufgabe 7.4.3

An welcher Stelle der Profilpolaren finden wir

a) die beste Gleitzahl?

b) den größten Auftrieb?

c) einen negativen Auftrieb? Was bedeutet das? Wo werden negative Auftriebe genutzt?

Fliegt das Flugzeug mit einem Anstellwinkel im Punkt P der Profilpolare, dann hat es in diesem Punkt die beste Gleitzahl. Das ist der kleinstmögliche Winkel zur Horizontalen, den ein Segelflugzeug (oder ein Flugzeug ohne Vortriebskraft) im besten Falle einnehmen kann, um aus einer aktuell vorhandenen Höhe möglichst weit zu gleiten.

Aufgabe 7.4.4

a) Welches Diagramm erwarten Sie, wenn man die Luftwiderstandskraft über der Strömungsgeschwindigkeit aufträgt?

b) Welches Diagramm erwarten Sie, wenn man die Auftriebskraft über dem Strömungswiderstand aufträgt?

c) Welches Diagramm erwarten Sie, wenn man die Auftriebskraft über der Luftwiderstandskraft aufträgt?

Aufgabe 7.4.5

a) Ein Segelflugzeug mit einer Masse von 500 kg gleitet bei konstanter Geschwindigkeit mit einem Gleitwinkel von $\varphi = 5^\circ$. Wie groß sind die Luftwiderstandskraft und die Auftriebskraft auf das Segelflugzeug bei diesem Gleitflug?

b) Moderne Segelflugzeuge, die bei Weltmeisterschaften eingesetzt werden, haben ein Gleitverhältnis von bis zu 1:52 bei einer Gleitgeschwindigkeit von 110 km/h. Wie lange kann solch ein Hochleistungssegler in 1.000 m Höhe (keine Thermik) bei einer Außenlandung nach einem Landeplatz Ausschau halten?

c) Am 15. Januar 2009 landete ein Airbus A320 im Hudson, nachdem ein Vogelschlag in 975 m Höhe beide Triebwerke lahmgelegt hatte. Das Gleitverhältnis eines A320 liegt bei etwa 1:17. Wie weit hätte das Flugzeug vor seiner Landung im Hudson maximal fliegen können?

7.5 Wirbel

Aus dem Alltag kennen wir verschiedene Körper: Festkörper, Flüssigkeiten und Gase. Flüssigkeiten und Gase haben gemeinsame Eigenschaften; man fasst sie zu sogenannten Fluiden zusammen. Unter einem Fluid (lat.: fluidus – fließend) versteht man eine Substanz, bei der die Zähigkeit (Widerstand gegen Scherkräfte) bei langsamen Verschiebungen verschwindet. Dies gilt nur für Flüssigkeiten und Gase, nicht für Festkörper.

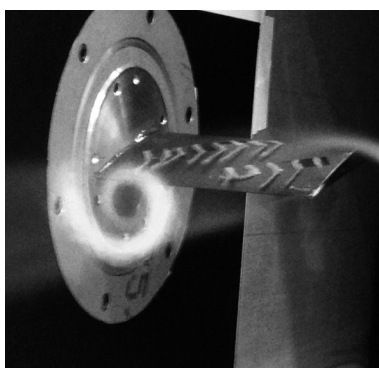
Wirbel, auch Vortex genannt, sind Kreisströmungen eines Fluids. Wirbel können sich nur bilden, wenn in einem Fluid (Flüssigkeit oder Gas) Geschwindigkeitsunterschiede (Geschwindigkeitsgradienten) vorhanden sind. In diesem Fall strömt ein Teil des Fluids (im Wirbelpfad) wesentlich schneller als der Rest des Fluids, in dem der Wirbel gewissermaßen „steht“.

Beispiele

Im Alltag begegnet man bei Fluiden einem Wirbel (Alltagssprache: Strudel), wenn das Wasser, z. B. in einem Waschbecken oder einer Badewanne, in das Abflussrohr strömt. Wenn man eine volle Wasserflasche öffnet und auf den Kopf stellt, fließt das Wasser mehr oder weniger gluckernd und relativ langsam aus der Öffnung. Bewegt man den Boden einer vollen Flasche einige Male im Kreis, dann entsteht in der Flasche ein Wirbel und das Wasser strömt wesentlich schneller aus der Flasche aus.

Wirbelschleppen

Beobachtet man die Startsequenzen auf einem Großflughafen, stellt man fest, dass die Flugzeugstarts auch bei Hochbetrieb einen minimalen Zeitabstand nicht unterschreiten. Diese zeitlichen Abstände sind notwendig, damit die Wirbel, die beim Start der Flugzeuge auf der Startbahn zurückbleiben, abgeklungen sind, bevor das nächste Flugzeug startet. Unterhalb der Tragfläche ist der Luftdruck größer als oberhalb der Tragfläche. Dieser Druckunterschied führt an den Kanten der Tragflächen zu einem Druckausgleich. Die Luft strömt aus dem Bereich des größeren Luftdrucks in den Bereich des kleineren Luftdrucks. Die Luft strömt von der Unterseite der Tragfläche nach oben auf die Oberseite und bildet hierbei einen Wirbel.

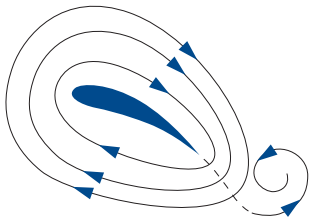


Randwirbel am Ende einer Modelltragfläche

Im Bild sieht man den Randwirbel am rechten Ende der Modelltragfläche im Windkanal in zweifacher Weise. Die Fäden auf der Tragfläche liegen ruhig – der Faden am rechten Rand der Tragfläche vollführt aber einen wilden Kreistanz in dem dort herrschenden Wirbel. Mithilfe der Rauchfahne und einem aufgefächerten Laserstrahl kann man diesen Randwirbel sichtbar machen.

Wirbel

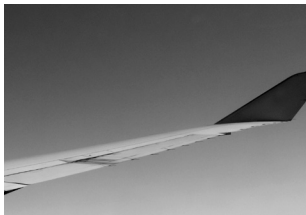
Wirbel entstehen, wenn Luft an einer Fläche (unter Luftwiderstand) vorbeiströmt, zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Geschwindigkeit aufeinander treffen oder Luft von der Unterseite einer Tragfläche (Überdruck) auf die Oberseite (Unterdruck) strömt. Bei der Entstehung eines Wirbels wird die Bewegungsenergie, die in der Strömung vorliegt, dieser Strömung entzogen – man spricht von „Energiedissipation“. Von einem stationären Wirbel (Wirbel bleibt am selben Ort) spricht man z. B. bei den Randwirbeln einer Flugzeugtragfläche, wenn eine stationäre Strömung vorliegt. Wirbel können sich aber auch periodisch ablösen oder ein völlig ungeordnetes Verhalten zeigen – in diesem Fall spricht man von einer turbulenten Strömung.



Anfahrwirbel am hinteren
Ende der Tragfläche

Airbus A380

Das Flugschiff der Airbus-Flotte, der A380, musste beim Zulassungsverfahren nachweisen, dass der Anfahrwirbel, den er auf der Anfahrbahn zurück lässt, schnell genug abklingt, so dass die üblichen Start-Takt-Frequenzen auf den Flughäfen eingehalten werden können.



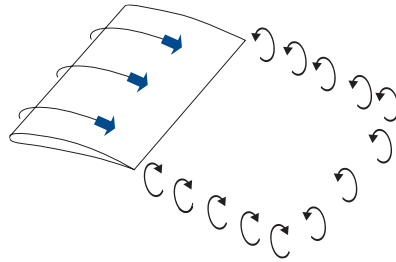
Winglets an den
Tragflächenenden

Zirkulation

Wir gehen davon aus, dass oberhalb der Tragflächen zusammen mit einer höheren Strömungsgeschwindigkeit (relativ zur Tragfläche) ein kleinerer statischer Druck vorhanden ist. Unterhalb der Tragfläche finden wir zusammen mit einer kleineren Strömungsgeschwindigkeit einen größeren statischen Druck. Die Tragfläche bewegt sich relativ zur umgebenden Luft. Die Zirkulation um die Tragfläche kann man mathematisch bestimmen, wenn man den Geschwindigkeitsvektor des Flugzeugs von den Geschwindigkeitsvektoren subtrahiert, die oberhalb und unterhalb der Tragfläche auftreten.

Zirkulation

Beschleunigt ein Flugzeug mit zunehmender Geschwindigkeit auf der Startbahn, dann herrschen nicht nur Druckunterschiede an den Flügelspitzen, sondern auch an der Hinterkante der Tragfläche. Hier entstehen Wirbel. An der hinteren Tragflächenkante löst er sich als sogenannter Anfahrwirbel ab. Entsprechend des Drehimpulserhaltungssatzes ergibt sich ein gleich großer Drehimpuls (Wirbel) um die Tragfläche: Dieser Wirbel wird Zirkulation genannt.



Wirbel an einer Tragfläche

Aufgabe 7.5.1

- a| Welche Funktion haben die sogenannten Winglets an den Enden der Tragfläche?
- b| Recherchieren Sie im Internet nach Umströmungs- und Wirbelbildern bei Tragflächen.
- c| Wenn man die Luftschicht über der Startbahn nach dem Start eines Flugzeugs untersucht, kann man einen „Randwirbel“ messen. Bevor das Flugzeug gestartet ist, war die Luft über der Startbahn ruhig. Welche Vorhersagen muss man treffen, wenn man diesen Anfahrwirbel feststellt und wenn man davon ausgeht, dass der Drehimpulserhaltungssatz gilt? Wo findet man den Gegen-Drehimpuls, den Gegenwirbel?
- d| Ein Flugzeug fährt von rechts nach links an uns vorbei und startet dann durch. Die linke Tragfläche des Flugzeugs zeigt hierbei in unsere Richtung. In welche Richtung dreht sich der Wirbel (Zirkulation) um die Tragfläche? In welche Richtung dreht sich der Anfahrwirbel auf der Startbahn?
- e| Dass viele Verkehrsflugzeuge im Luftraum über Europa fliegen, kann man an den Kondensstreifen erkennen, die die Flugzeuge hinter sich her ziehen. Wie entstehen diese Kondensstreifen?



Kondensstreifen einer
Passagiermaschine