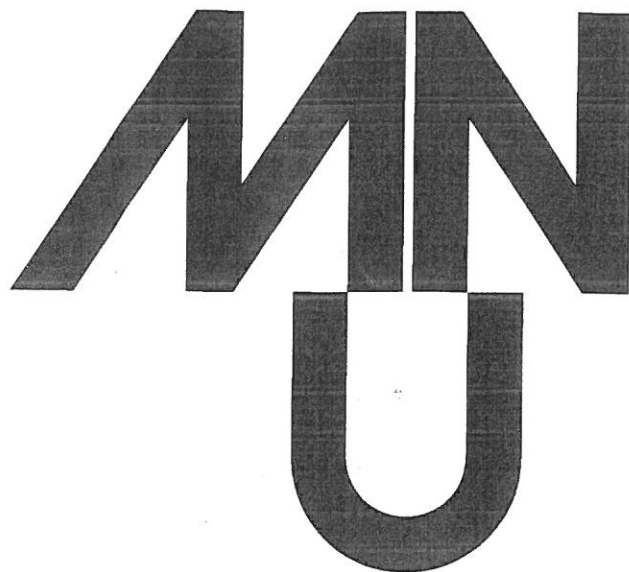


Der mathematische und
naturwissenschaftliche Unterricht



Jahrgang 55 • 2002 • Heft 7

Schülerinnenmotivation

Flugphysik

Versinken wir im Mittelmaß?

Die Folgenmaschine

Ägyptische Wasseruhren

Stochastik mit Maple

Der Energiemotor

Vorstellungen zum Sieden

Saurer Regen und Schweinemast

Färben mit Pflanzen

Eine einfache Approximation

Bildungsverlag
E1NS
Dümmler

Flugphysik

– um das Fliegen zu verstehen

Der aerodynamische Auftrieb ist global gesehen die Reaktionskraft, die infolge der Vertikalbeschleunigung von Luft durch die Tragfläche auftritt. Der Auftrieb ist eine Folge der Trägheit der Luft. Druckdifferenzen entstehen in Strömungsfeldern, wenn durch Hindernisse gekrümmte Stromlinien erzwungen werden. Die Analyse der Krümmungen in realen Strömungen um Hindernisse erschließt die Druckverteilung an Profilen. Die Zirkulation ist die Folge, nicht die Ursache der Auftriebsentstehung. Ebenso ist die höhere Strömungsgeschwindigkeit an der Tragflächenoberseite die Folge, nicht aber die Ursache des Unterdrucks.

1 Einleitung

Flugzeuge und Fliegen sind heute alltäglich. Trotzdem ist die Frage, wie und warum Flugzeuge fliegen können, für Schüler aller Altersstufen interessant. Das Thema Fliegen beschäftigt Schüler in ihrer Freizeit. Im Physikunterricht steht es jedoch völlig am Rande. Physiklehrer verzichten in der Regel darauf, die Attraktivität des Themas zu nutzen, um Schüler für die Physik zu motivieren und ihnen mit der Physik Antwort auf vorhandene Fragen zu geben. Ein Grund dafür könnte sein, dass die meisten Lehrer während ihres Studiums eine Erklärung des Fliegens kennenlernten, die sie selbst nicht befriedigt und überzeugt hat. Die Darstellungen in den Lehrbüchern sind nicht einheitlich und zum Teil widersprüchlich. Zur Zeit ist die Darstellung der Flugphysik in einem Umbruch begriffen. Einigkeit besteht inzwischen darin, dass die in der Vergangenheit vorherrschende Erklärung auf der Basis des Bernoulli'schen Gesetzes und einer Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Luftströmungen auf der Tragflächenoberseite und der Tragflächenunterseite unbefriedigend ist. Entweder wird kein Grund für die Geschwindigkeitsdifferenz genannt, oder es werden falsche Begründungen wie Weglängenbetrachtungen gegeben [1, 2, 3]. Ein sachlich tragfähiges und für die Lehre geeignetes Erklärungsmuster setzt sich durch, das auf den Grundprinzipien der Newton'schen Mechanik aufbaut und den Auftrieb als Reaktionskraft der von der Tragfläche nach unten beschleunigten Luftmassen darstellt [3, 4, 5]. Damit werden der Auftrieb an der Tragfläche, der Auftrieb beim Hubschrauber und der Vortrieb beim Propeller aus dem gleichen Ansatz heraus erklärt. Im Anschluss an einen eigenen früheren Beitrag [3] und WODZINSKI und ZIEGLER [5] wird das fundamentale Defizit bei der Erklärung des Auftriebs mit Hilfe des Bernoulli'schen Gesetzes aufgezeigt, ein für den Unterricht geeignetes Erklärungsmuster vorgeschlagen und die Druckentstehung in

strömenden Flüssigkeiten erläutert. Dabei wird im übrigen deutlich, dass die Entstehung von Unterdruck nicht, wie in [5] vorgeschlagen, mit Hilfe der Zirkulation in Verbindung mit dem Bernoulli'schen Gesetz erklärt werden kann, sondern mit Hilfe der Druckgradienten erklärt wird, die bei gekrümmten Stromlinien entstehen.

2 Die konventionelle Erklärung auf der Grundlage des Bernoulli'schen Gesetzes

Die konventionelle Erklärung findet sich noch in vielen Lehrbüchern für Schule und Hochschule. Die meisten Lehrer werden sie in ihrem Studium kennen gelernt haben: Als Grundlage wird das Bernoulli'sche Gesetz über den gegenläufigen Zusammenhang zwischen Druck und Geschwindigkeit in strömenden Flüssigkeiten und Gasen dargestellt. Der Zusammenhang wird entweder als Tatsache mitgeteilt, an Beispielen demonstriert oder mit Hilfe von Energiebetrachtungen abgeleitet. Dann wird das Stromlinienbild eines von vorn angeströmten Tragflächenprofils gezeigt (Abb. 1). Dem folgt die Feststellung, dass die Strömungsgeschwindigkeit auf der Oberseite größer ist als auf der Unterseite. Schließlich wird in Verbindung mit dem Bernoulli'schen Gesetz diese Geschwindigkeitsdifferenz als Ursache für Unterdruck an der Tragflächenoberseite und Überdruck an der Tragflächenunterseite angegeben.

Diese Erklärung ist unvollständig. Wenn Geschwindigkeitsdifferenzen als Ursache für Druckdifferenzen genannt werden, muss noch ein physikalischer Grund für die Entstehung eben dieser Geschwindigkeitsdifferenzen angegeben werden. Hier liegt die fundamentale Schwierigkeit der konventionellen Darstellungen. Drei Begründungsansätze finden sich häufiger:

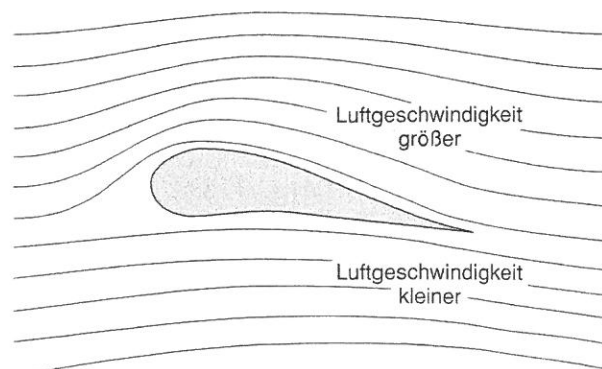


Abb. 1. Umströmtes Tragflächenprofil

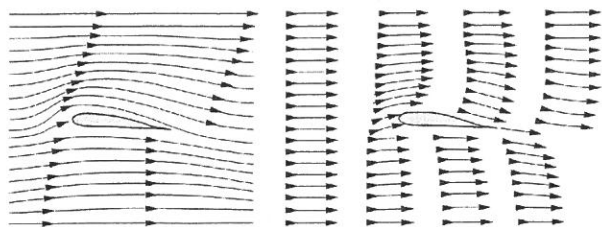


Abb. 2. Stromlinien eines von vorn angeströmten Profils. Links: reale Aufnahme, benachbarte Luftvolumina vor und nach dem Vorbeigang, Rechts: theoretische Berechnung [4].

2.1 Begründung der Geschwindigkeitsdifferenzen mit Weglängenbetrachtungen

Ein Beispiel aus jüngster Zeit sei zitiert [6]: »Vom Flugzeug aus gesehen, strömt die Luft oben mit der Geschwindigkeit v_{oben} und unten mit der Geschwindigkeit v_{unten} vorbei. Wegen der größeren Krümmung des Flügels ist der Weg oben weiter als unten, also v_{oben} größer als v_{unten} . Entsprechend ist der statische Druck oben klein.«

Bei SEXL, RAAB und STREERUWITZ [7] heißt es: »Die Luftteilchen bewegen sich also längs der Oberseite wegen des längeren Weges rascher als auf der Unterseite. Infolgedessen ist der Druck auf der Oberseite geringer als der Druck, der auf die Unterseite einwirkt.«

Dieser Argumentation liegt die stillschweigende Hypothese zugrunde, dass Luftteilchen, die vor der Tragfläche benachbart waren, auch hinter der Tragfläche wieder zusammentreffen müssten. Dies ist falsch. In Wirklichkeit treffen die vor der Umströmung benachbarten Luftvolumina nicht mehr zusammen. In Abbildung 2 wird dies für eine reale Umströmung und für eine berechnete Strömung gezeigt.

Den Weglängenbetrachtungen ist damit der Boden entzogen. Sie sind irreführend und falsch. Viele Lehrbuchautoren haben diese Betrachtungen inzwischen eliminiert und durch Impulsbetrachtungen ersetzt. Andere Autoren benutzten sie auch bei Neuauflagen und sogar bei der Neuentwicklung von Lehrbüchern.

2.2 Begründung der Geschwindigkeitsdifferenz mit Hilfe des Begriffs der Zirkulation

Ausgangspunkt ist hier die Darstellung der Potentialströmung um ein Tragflächenprofil, die sich als Lösung der Euler'schen Gleichungen bei Reibungsfreiheit ergibt. Bei dieser Potentialströmung fließt die Strömung nicht an der Hinterkante der Tragfläche glatt ab, sondern um die Hinterkante ein wenig nach oben herum. Die reale Umströmung, sie wird auch »gesunde Umströmung« genannt, kann man theoretisch erst berechnen, wenn man der Potentialströmung eine Zirkulationsströmung überlagert. Die Größe der Zirkulation wird durch die Forderung bestimmt, dass die Strömung an der Hinterkante glatt abfließen muss (Abb. 3). In der Theorie lässt sich so ein Stromlinienbild berechnen, aus dem sich die Geschwindigkeitsverteilung und über das Bernoulli'sche Gesetz der Druck korrekt bestimmen lassen. Die Zirkulation ist

eine quantitative Beschreibung für die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Tragflächenoberseite und Tragflächenunterseite.

Das Problem der Entstehung der Geschwindigkeitsdifferenzen ist damit nicht gelöst, sondern nur verlagert. Hier muss jetzt erklärt werden, wie die Zirkulation durch die Tragfläche hervorgerufen wird. Dies geschieht aber in den Lehrbüchern nicht. Zwar findet man Hinweise auf den Anfahrwirbel, der beobachtet werden kann, wenn sich die Zirkulation um die Tragfläche aufbaut [5]. Doch der Anfahrwirbel ist wegen der Helmholtz'schen Erhaltungssätze der Gegenwirbel zu der sich aufbauenden Zirkulation. Er ist die Folge der Zirkulation aber nicht deren Ursache. In [8] wird die Erzeugung der Zirkulation für den rotierenden Zylinder durch Reibung erklärt, nicht aber für die Tragfläche erläutert. Auch dieser Erklärungsansatz ist unvollständig.

2.3 Leere Begründungen

Gelegentlich wird argumentiert, dass durch die Form der Tragflächen die Stromlinien oben zusammengedrängt werden und unter der Oberfläche einen größeren Abstand voneinander haben, was eine Geschwindigkeitsdifferenz zur Folge haben müsse. Derartige Argumentationen sind unphysikalisch und verschleiern nur, dass kein Grund für die Geschwindigkeitsdifferenzen angegeben werden kann.

Die konventionelle Erklärung ist unvollständig, weil keine physikalische Begründung für die Geschwindigkeitsverteilung der Strömung angegeben werden kann.

3 Auftrieb als Rückstoß – Auftrieb und Impuls

Grundlage dieser Betrachtung ist die Reaktionskraft, die bei der Beschleunigung von Luftmassen auftritt, kurz Rückstoß genannt. In der Lehrbuchliteratur wird der Vortrieb von Propellern und der Auftrieb von

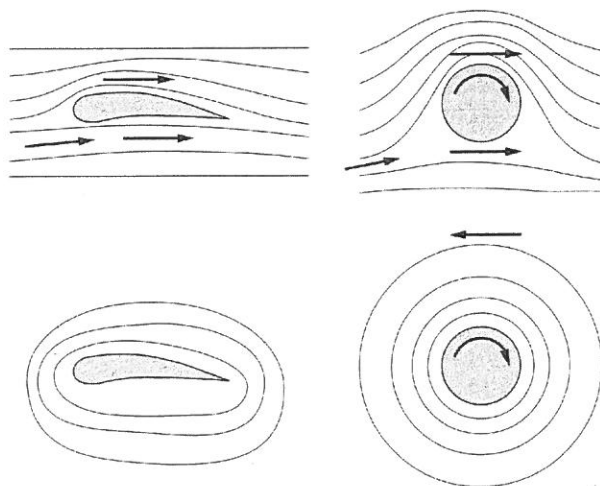


Abb. 3. Oben: Umströmung von Tragfläche und rotierendem Zylinder. Unten: Das Bezugssystem bewegt sich mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit mit (aus [8]).

Hubschrauberrotoren einheitlich durch Impulsbetrachtungen erklärt. In beiden Fällen werden Luftmassen beschleunigt. Dafür müssen Kräfte auf diese ausgeübt werden. Die entsprechenden Reaktionskräfte sind beim Hubschrauber der Auftrieb und beim Propeller der Vortrieb. Quantitativ ergeben sich diese Kräfte aus dem Impulsstrom. Experimentell lässt sich die beschleunigte Luft hinter dem Propeller oder unter dem Hubschrauber demonstrieren.

Genauso lässt sich auch die Wirkung der Tragfläche verstehen. Sie ist eine leicht schräg stehende gewölbte Fläche, die bei einer Horizontalbewegung die ursprüngliche ruhende Luft nach unten beschleunigt. Die Reaktionskraft wirkt nach oben, sie ist der Auftrieb.

Die Vertikalbeschleunigung der ursprünglich ruhenden Luft lässt sich einfach und eindrucksvoll demonstrieren. Dazu benötigen wir eine Bewegungssonde, die sich leicht improvisieren lässt. An einer dünnen Holzleiste wird an einem Ende ein horizontal ausgerichtetes Papierblatt (Postkarte) befestigt. Am anderen Ende befestigen wir ein Gegengewicht. Im Schwerpunkt wird die Leiste mit einem Faden an einer Stativstange aufgehängt (Abb. 4). Das Papierblatt folgt sehr empfindlich allen Luftbewegungen und macht sie somit sichtbar.

Bewegt man eine Tragfläche mit Anstellwinkel von möglichst weit her kommend unterhalb des Papierblattes horizontal vorbei, schwingt das Papierblatt nach unten. Führt man die Tragfläche über dem Papierblatt vorbei, tritt dieselbe Bewegung auf, allerdings etwas schwächer ausgeprägt. Die vertikale Bewegung der Luft nimmt zu, wenn man den Einstellwinkel vergrößert. Sie nimmt auch zu, wenn man die Geschwindigkeit der Tragfläche vergrößert. Weiter lässt sich so zeigen, dass auch Luft deutlich oberhalb der Tragfläche nach unten beschleunigt wird. Die Vertikalbeschleunigung der Luft ist also nicht auf die ganz unmittelbare Umgebung der Tragfläche beschränkt, sondern erstreckt sich nach oben und nach unten. Dies sollte man immer demonstrieren, um der Vorstellung vorzubeugen, dass die Luft gewisserma-

ßen in Form von kleinen Kugeln auf die Tragfläche trifft, die dann nach unten abprallen. Diese Fehlvorstellung geht auf NEWTON zurück.

Stellt man das Papierblatt senkrecht, wird es oberhalb der Tragfläche nach hinten und unterhalb nach vorn bewegt. Im Zusammenhang mit der Vertikalbewegung hinter der Tragfläche ergibt sich so das Bild einer Zirkulation um die Tragfläche. Die Untersuchung der Wirkung der Tragfläche auf die zunächst ruhende Luft ist auch deshalb für das Verständnis nützlich, weil dies der Standpunkt des auf der Erde ruhenden Beobachters ist.

In den Lehrbuchdarstellungen ist der Standpunkt des mit der Tragfläche bewegten Beobachters üblich. Dann lenkt die Tragfläche den von vorn horizontal anströmenden Luftstrom nach unten ab. Dies lässt sich demonstrieren, indem man Wollfäden oder Seidenpapierfähnchen an die Hinterkante einer Tragfläche klebt. Sie zeigen die Richtung der abströmenden Luft an. Den Luftstrom erzeugt man mit einem einfachen Gebläse, notfalls mit einem Fön. Wenn der Luftstrom eng begrenzt ist, muss man sorgfältig darauf achten, dass das Tragflächenmodell in der Mitte des Luftstroms bleibt. Variiert man den Anstellwinkel, folgt die Richtung der Wollfäden etwa der Mittellinie des Profils. Der Versuch wirkt besonders instruktiv, wenn man den Anstellwinkel stark verändert und weiter zeigt, dass bei negativem Anstellwinkel die Luftströmung auch nach oben abgelenkt werden kann.

Betrachten wir den von der Tragfläche verursachten vertikalen Impulsfluss, so ergeben sich daraus folgerichtig alle fundamentalen Zusammenhänge, die in der konventionellen Darstellung immer isoliert und ohne Begründung mitgeteilt wurden. Damit kann die Flugphysik kohärent und als interessante Anwendung der Mechanik dargestellt werden.

Auftrieb und Anstellwinkel: Wenn die Luftströmung in der unmittelbaren Umgebung hinter dem Profil dessen Mittellinie folgt, so wird sie um so mehr nach unten umgelenkt, je größer der Anstellwinkel ist. In einem Bereich von -10 Grad $+20$ Grad steigt der Auftrieb näherungsweise linear mit dem Anstellwin-

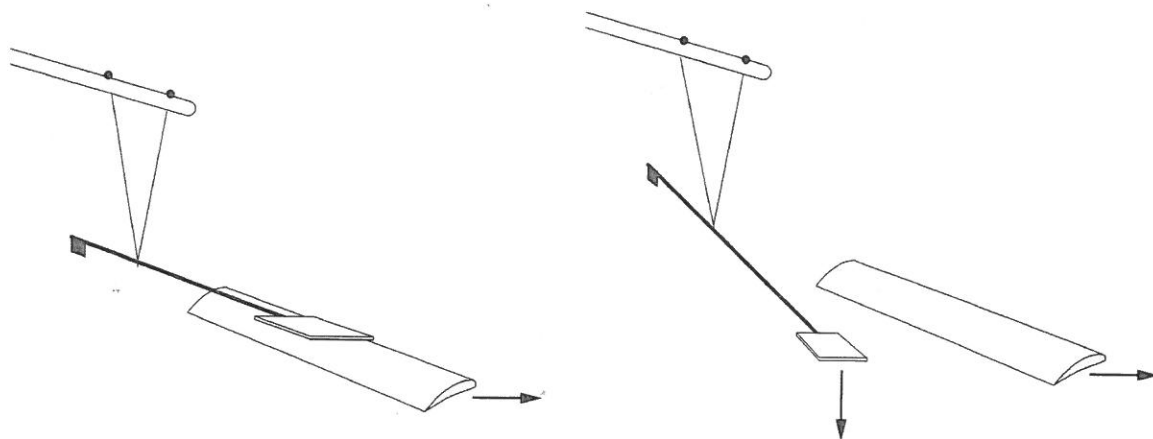


Abb. 4. Bewegungssonde: Frei beweglich aufgehängtes Papierblatt. Links: Position des Papierblatts vor dem Vorbeigang der Tragfläche, Rechts: Position nach dem Vorbeigang der Tragfläche. Leichter Holzstab, Querschnitt etwa $0,5\text{ cm} \times 0,5\text{ cm}$. Länge etwa 1 m . Ausgleichsgewicht, um den Schwerpunkt von dem Papierblatt zu entfernen. Papierblatt etwa $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. Eine Tragfläche kann aus leichter Pappe (Aktendeckel) zusammengeklebt werden. Aufmasse etwa $60\text{ cm} \times 15\text{ cm}$.

kel an. Wird der Anstellwinkel größer, bilden sich an der Oberseite der Tragfläche Wirbel, die Strömung wird turbulent und reißt ab. Dann geht der Auftrieb zurück und der Luftwiderstand steigt an.

Auftrieb und Strömungsgeschwindigkeit: Bei einer Verdoppelung der Strömungsgeschwindigkeit bleibt die Geometrie des Strömungsfeldes erhalten. Es verdoppeln sich die pro Zeiteinheit umgelenkte Masse der Luft und die Vertikalkomponente der Strömungsgeschwindigkeit.

Damit kann bei doppelter Anströmgeschwindigkeit ein vierfacher Auftrieb erwartet werden. Will man dies quantitativ im Experiment demonstrieren, braucht man ein Gebläse und einen Geschwindigkeitsmesser für die Luftströmung.

Auftrieb und Luftdichte: Die Reaktionskräfte sind proportional zur beschleunigten Masse und damit zur Dichte. Beispiel: Beim Reiseflug in Höhen in etwa 12 000 Meter betragen Luftdruck und Dichte nur noch etwa ein Viertel der entsprechenden Werte am Boden. Der Auftriebsverlust wird kompensiert, indem die Geschwindigkeit verdoppelt wird. Der Luftwiderstand hängt in gleicher Weise von der Luftdichte ab wie der Auftrieb. Also erlaubt der gleiche Schub eine doppelte Reisegeschwindigkeit.

Zur Zeit setzen sich Impulsbetrachtungen dieser Art als physikalisch orientierte Erklärungen für die Physik der Auftriebserzeugung national [9] wie international [4] durch. Sie sind für den Unterricht besonders geeignet, weil viele Phänomene durch einen einheitlichen Ansatz verbunden sind: Auftrieb von Tragfläche und Hubschrauber, Vortrieb des Propellers und des Düsentriebwerks, Wirkung von Seitenruder, Höhenruder und Landeklappen, Tragflächenboot, Wasserski, Rückstoß bei Wasserspritzen u. a. Schüler aller Altersstufen können so verstehen, dass es die Trägheit der Luft ist, die das Fliegen ermöglicht. Es ist genau derselbe Rückstoß, den sie aus dem Alltag kennen. Weiter bedarf es für die Durchführung der fundamentalen Demonstrationen keiner teureren Ausrüstung. Allerdings bleibt noch der Mechanismus der Kraftübertragung auf die Tragfläche zu erklären, also die Entstehung des Unterdrucks an der Oberseite und des Überdrucks an der Unterseite.

4 Der Mechanismus der Kraftübertragung zwischen Luft und Tragfläche

4.1 Die eindimensionale Euler-Gleichung

Die Euler'schen Gleichungen sind die Grundlagen für die Strömungsdynamik ohne Reibung. Sie beschreiben die Zusammenhänge zwischen Druckgradienten und Beschleunigungen in strömenden Fluiden [10]. Ihre Grundlage ist das Newton'sche Bewegungsgesetz. Wird die Reibung berücksichtigt, bekommt man die Navier-Stokes-Gleichungen. Für unsere Zwecke ist es ausreichend, die einfachste Form der Euler'schen Gleichung für eine Stromröhre bei stationärer Strömung und ohne Gravitation zu betrachten. Für ein kubisches Luftvolumen in einer beliebigen Stromröhre eines Strömungsfeldes gilt dann $F = \Delta m a$.

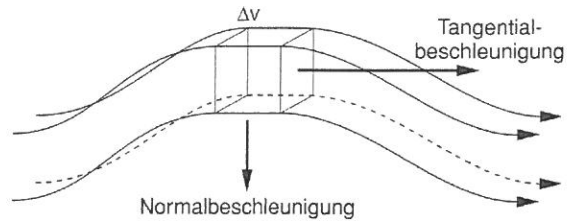


Abb. 5. Beschleunigung eines Luftvolumens

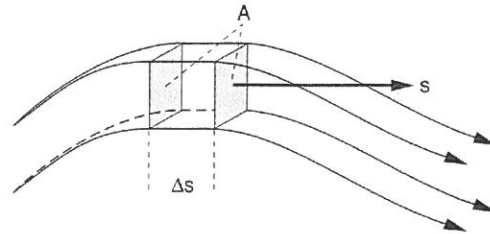


Abb. 6. Tangentialbeschleunigung eines Luftvolumens mit Seitenflächen A

Für jede Richtung des Koordinatensystems gilt, dass eine Kraft auf das Luftvolumen wirkt, wenn es Druckdifferenzen gibt, die auf einander gegenüber liegende Flächen wirken.

Für das Bezugssystem in der Abbildung 5 müssen wir, wie immer in der Mechanik, zwei Beschleunigungen getrennt betrachten: die Tangentialbeschleunigung in Bewegungsrichtung und die Normalbeschleunigung senkrecht zur Bewegungsrichtung.

Tangentialbeschleunigung: Das Luftvolumen wird in Richtung der Geschwindigkeit (s -Richtung) beschleunigt, wenn der Druck auf die hintere Fläche des Volumenelementes größer ist als auf die vordere Fläche (Abb. 6).

Das Volumenelement wird also schneller, wenn der Druck abfällt, und sich das Volumen in ein Gebiet niedrigeren Drucks hinein bewegt. Daher auch das negative Vorzeichen in der Grundgleichung:

$$\Delta m \cdot \vec{s} = F = -A \frac{\delta p}{\delta s} \cdot \Delta s.$$

Mit dem Massenelement $\Delta m = \rho A \Delta s$ ergibt sich

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{dp}{ds}.$$

Diese Gleichung lässt sich nach Umformung integrieren und ergibt das Bernoulli'sche Gesetz:

$$\int_1^2 p \cdot dv \frac{ds}{dt} = -\int_1^2 dp, \quad \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2) = p_1 - p_2.$$

Im Unterricht wird dieses meist mit Hilfe des Energiesatzes für eine Stromröhre mit variablem Querschnitt abgeleitet. Das ist einfach, verschleiert aber die physikalischen Zusammenhänge und leistet Fehlinterpretationen Vorschub. Es wird dabei nicht deutlich, dass die Ursache für die Geschwindigkeitszunahme ein Druckabfall in Strömungsrichtung ist. Eine höhere Strömungsgeschwindigkeit kann also nicht die Ursache für niedrigeren Druck sein. Sie ist immer dessen Folge.

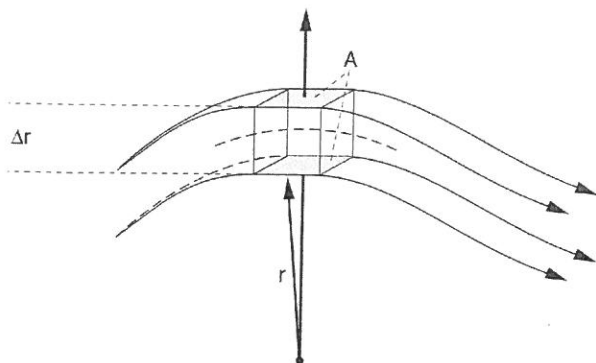


Abb. 7. Normalbeschleunigung eines Luftvolumens mit Seitenflächen A

Wer diesen Zusammenhang verstanden hat, kommt nie in Versuchung, eine höhere Strömungsgeschwindigkeit als Ursache für die Absenkung von Druck anzugeben. Genau das geschieht aber in der konventionellen Erklärung des aerodynamischen Auftriebs. Das Bernoulli'sche Gesetz ermöglicht es, Geschwindigkeitsmessungen auf Messungen des statischen Druckes zurückzuführen.

Normalbeschleunigung: Eine Normalbeschleunigung in z-Richtung tritt auf, wenn Stromröhren gekrümmt sind (Abb. 7). Für eine Beschleunigung in Richtung auf den Krümmungsmittelpunkt hin muss dann der Druck auf die obere Fläche größer sein als auf die untere. Vom Krümmungsmittelpunkt nach außen gehend nimmt der Druck zu, daher das negative Vorzeichen in der Grundgleichung:

$$dm \cdot \ddot{z} = F = -A \frac{\delta p}{\delta z} \cdot dz.$$

Die lokale Beschleunigung in z-Richtung ist die Radialbeschleunigung auf einer Kreisbahn mit dem Krümmungsradius R:

$$\ddot{z} = -\frac{v^2}{R}.$$

Das Massenelement ist $dm = \rho A dz$. Dies setzen wir ein und erhalten einen Ausdruck für den Druckgradienten senkrecht zur Strömungsgeschwindigkeit:

$$\frac{dp}{dz} = \rho \frac{v^2}{R}.$$

Dabei ist z die Normalenrichtung, R der Krümmungsradius und v die Geschwindigkeit.

Sind in einem Strömungsfeld die Stromlinien gekrümmt, existieren in dem Strömungsfeld Druckgradienten senkrecht zu den Stromlinien. Die Druckgradienten sind von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig, sie wachsen mit v^2 und mit der Krümmung $1/R$. Die Gleichung kann allerdings nicht direkt integriert werden. Dazu muss das gesamte Strömungsfeld quantitativ bekannt sein. Der Zusammenhang ist aber von großem Wert, weil er es ermöglicht, qualitativ die physikalischen Zusammenhänge zu verstehen, die zur Entstehung von Druck und Überdruck führen. Normalbeschleunigungen und die damit verbundenen

Druckgradienten senkrecht zu den Stromlinien werden in den Lehrbüchern der Physik nicht erwähnt, im Gegensatz zu den Lehrbüchern der technischen Störungslehre. Das ist bedauerlich, denn nur dieser Zusammenhang lässt die Entstehung und Erzeugung von Druck und Unterdruck bei der Umströmung von Hindernissen physikalisch verstehen. Wir können bei Stromlinienbildern unmittelbar aus den Krümmungen auf die Größe und Richtung der Druckgradienten schließen.

4.2 Umströmung von Hindernissen, Coanda-Effekt

Für bestimmte stromlinienförmige Hindernisse mit spitzer Hinterkante folgt die Strömung ihrer geometrischen Form. Ist das Hindernis klein gegenüber den Abmessungen der ungestörten Strömung, folgen die Stromlinien in der Nähe recht genau der geometrischen Form des Hindernisses, in größerer Entfernung nimmt die Störung ab, und es herrscht weit entfernt wieder die ungestörte Strömung. Dieses Verhalten einer Strömung, an Oberflächen anzuliegen und ihrer geometrischen Form zu folgen, heißt Coanda-Effekt. Es ist zwar plausibel aber keineswegs trivial. Es gilt auch nicht immer, denn wenn die Strömung durch Kanten zu abrupten Richtungsänderungen gezwungen wird, entstehen Turbulenzen und die Strömung löst sich ab. Der Coanda-Effekt setzt eine, wenn auch geringe, Reibung voraus.

Wir können den Coanda-Effekt und die Rolle der Reibung durch einen Gedankenversuch verstehen. Wird ein Luftstrahl gemäß Abbildung 8 über einen Halbzylinder geblasen, liegt der Luftstrom zunächst der Form des Zylinders an und folgt dessen Geometrie, um sich erst später abzulösen. Gäbe es keine Reibung, könnte der Luftstrahl wie in Abbildung 9 infolge seiner Trägheit oberhalb gerade weiter strömen, weil dann keine Wechselwirkung mit der unteren Luftschicht bestünde. Mit Reibung ist dies anders. Die Luft wird immer im markierten Grenzbereich von der Strömung mitgenommen, dadurch bildet sich in diesem Bereich ein Unterdruck aus. Es entsteht ein Druckgradient, der zu einer Ablenkung der Strömung nach unten und schließlich zu einem Anlegen führt.

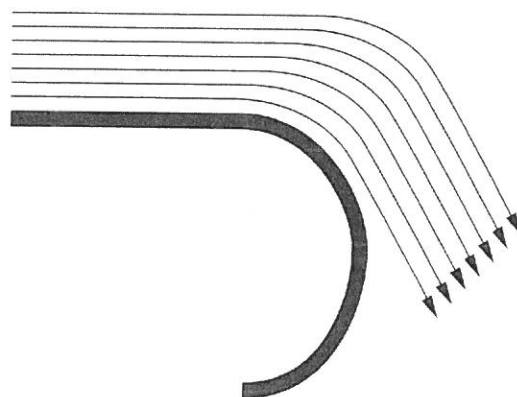


Abb. 8. Coanda-Effekt

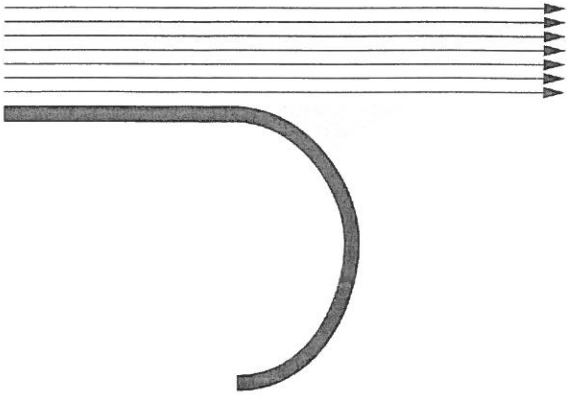


Abb. 9. Gedankenversuch zum Coanda-Effekt

4.3 Grundversuch zur Erzeugung von Über- und Unterdruck

In jedem Unterricht sollte der folgende instruktive und fundamentale Versuch gezeigt werden, bei dem die Erzeugung von Über- und Unterdruck durch die Umlenkung einer Luftströmung demonstriert wird. Man benötigt dafür ein empfindliches Schrägrohrmanometer mit einer Scheibensonde sowie eine gekrümmte Umlenkfläche. In vielen Schulen fehlen Geräte für eine experimentelle Behandlung der Strömungsphysik. Die wichtigsten Versuche sind glücklicherweise mit Anordnungen möglich, die leicht selbst hergestellt werden können. Für ein empfindliches Schrägrohrmanometer wird eine Glasröhre mit Stativmaterial schräg eingespannt und mit Hilfe von Schläuchen mit einem Vorratsgefäß so verbunden, dass der Wasserminiskus etwa in der Hälfte der Glasröhre steht. Durch Variieren der Neigung kann die Empfindlichkeit eingestellt werden. Bei einer Steigung von 1/20 entspricht eine Druckdifferenz von 10 Pascal dann einer Verschiebung des Meniskus um 20 mm. Das Rohr kann mit Ringen aus Klebestreifen markiert und kalibriert werden. Ist kein Glasrohr greifbar, kann man auch einen transparenten Kunststoffschlauch benutzen, der auf einer Holzleiste befestigt wird. Eine gewisse Sorgfalt muss bei der Herstellung der Drucksonde verwendet werden, die mit dem Rohr durch einen Gummischlauch verbunden wird. Bei der Messung darf die Strömung durch die Sonde nicht gestört werden. Daher muss eine Scheibensonde benutzt werden. Herstellung: Oben auf ein Glasrohr wird eine dünne Metallscheibe oder Kunststoffscheibe geklebt, die in der Mitte durchbohrt ist. Wird diese Scheibensonde so gehalten, dass die Luftströmung

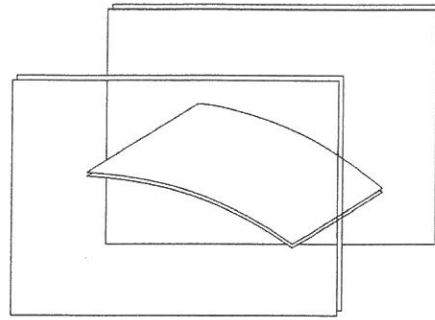


Abb. 10. Umlenkfläche mit Seitenbegrenzung für Versuche im Luftstrahl eines Föns

parallel an der Scheibe vorbei strömt, wird eine Störung der Strömung weitgehend verhindert und der statische Druck gemessen.

Die Luftströmung wird mit Hilfe eines Gebläses erzeugt. Für viele Zwecke genügt ein handelsüblicher Fön. Eine gekrümmte Umlenkfläche lässt sich leicht aus zwei Pappstreifen herstellen, die aufeinander geklebt werden. Bevor der Klebstoff trocknet, wird der Doppelstreifen in die gewünschte Form gebracht und bis zum Abbinden fixiert. Die gekrümmte Fläche wird zwischen zwei durchsichtige Kunststoff- oder Glasscheiben geklebt. Die begrenzenden Scheiben sorgen dafür, dass zwischen den Platten die Strömung weitgehend homogen bleibt. Es empfiehlt sich zum Schluss noch, einen Holzstab an eine der Platten zu kleben, um die Fläche besser mit Stativmaterial fixieren zu können (Abb. 10).

Im Versuch wird die Umlenkfläche horizontal und mittig angeströmt. Die Scheibe der Sonde muss parallel zur Strömungsrichtung gehalten werden. So lässt sich zeigen, dass oben ein Überdruck und unten ein Unterdruck entsteht (Abb. 11).

Die Entstehung des Überdrucks an der Unterseite ist unmittelbar verständlich. Die Luftströmung hat keine andere Möglichkeit, als der Fläche nach unten auszuweichen. Dabei werden die weiteren umgebenden Schichten der Strömung ebenfalls nach unten abgelenkt. Die Beschleunigung ist nach unten gerichtet, der Druckgradient nach oben. Das bedeutet, der Druck nimmt zu, je weiter man sich von außen kommend der Fläche nähert. Außen herrscht in einem freien Luftstrahl Atmosphärendruck. An der Unterseite haben wir daher Überdruck.

An der Oberseite der Fläche liegt die Luftströmung wegen des Coanda-Effektes an. Die Luftvolumina werden in Richtung des Krümmungsmittelpunktes beschleunigt. Die dafür notwendige Kraft bei dieser Zwangsbewegung

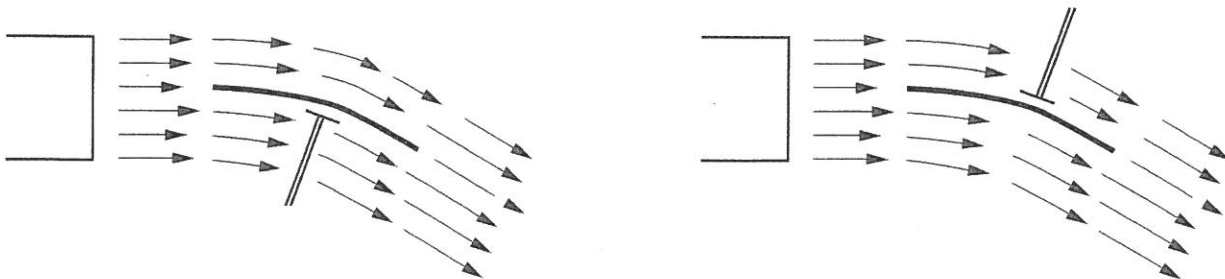


Abb. 11. Erzeugung von Unterdruck und Überdruck durch Ablenken einer Luftströmung.
Links: Messung an der Unterseite, rechts: Messung an der Oberseite

entsteht dadurch, dass die Luftvolumina – und damit die Stromröhren – sich gerade soweit von der Oberfläche entfernen, bis der für die Normalbeschleunigung erforderliche Druckgradient senkrecht zur Stromröhre entsteht. Schüler kann man an eine Analogie erinnern: Wird ein Stein an einem Gummiband herumgeschleudert, dehnt sich das Gummiband so weit aus, bis die für die Kreisbewegung notwendige Zentripetalkraft erreicht ist. Betrachtet man die Bewegung der Luftvolumina als Zwangsbewegung, können wir sagen, dass der Druckgradient von den Zentrifugalkräften hervorgerufen wird und diese kompensiert. An der Flächenoberseite bildet sich ein Unterdruckbereich.

Zusammenfassend stellen wir fest: Überdruck entsteht, wenn die Luftströmung von der Fläche aus gesehen nach außen beschleunigt wird. Unterdruck entsteht, wenn die Luft auf die Fläche hin beschleunigt wird.

Entstehung der höheren Strömungsgeschwindigkeit an der Tragflächenoberseite: Wir haben gesehen, dass oben ein Unterdruck durch die Umlenkung erzeugt wird. Dieses hat eine weitere Konsequenz: Die von vorn anströmende Luft strömt in einen Unterdruckbereich hinein und wird beschleunigt. Der durch die Umlenkung verursachte Unterdruck verursacht also eine höhere Strömungsgeschwindigkeit, wie es im Übrigen das Bernoulli'sche Gesetz beschreibt. Nur ist der kausale Zusammenhang ein anderer als in der konventionellen Erklärung des aerodynamischen Auftriebs. Die höhere Strömungsgeschwindigkeit ist die Folge, nicht die Ursache des Unterdrucks an der Tragflächenoberseite. Aus diesem Grunde müssen alle Versuche scheitern, die höhere Strömungsgeschwindigkeit oben als Ursache für den Unterdruck anzusehen.

4.4 Krümmungsanalyse von Stromlinienbildern

Anhand von Stromlinienbildern lässt sich von der Krümmung auf die Richtung und Stärke von Druckgradienten schließen. Stromlinienbilder realer Strömungen lassen sich im Windkanal durch Rauchfäden sichtbar machen oder theoretisch durch numerische Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen bestimmen. Wenn wir

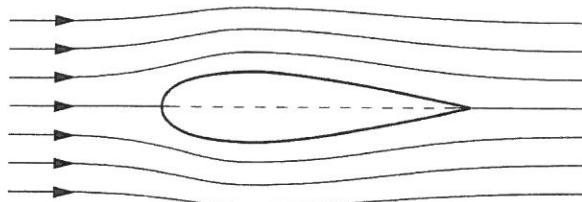


Abb. 12. Symmetrisches Profil. Links: Strömungsbild, rechts: Kräfte auf die Oberfläche, entsprechend der Druckverteilung.

5 Zirkulation und aerodynamischer Auftrieb

5.1 Zirkulation

Der Begriff Zirkulation hat eine große Bedeutung in der Strömungsdynamik. Zirkulation und aerodynamischer Auftrieb sind miteinander verknüpft. Der Auf-

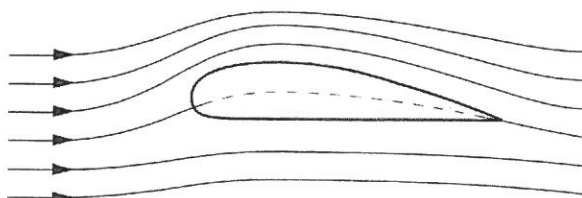
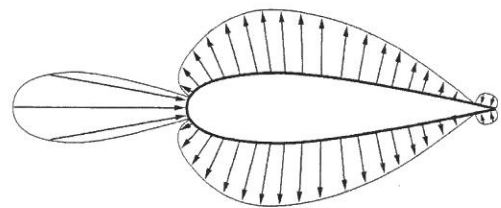
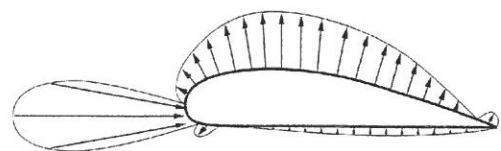


Abb. 13. Links: Stromlinienbild eines Profils mit ebener horizontaler Unterseite, rechts: Kräfte auf die Oberflächen, entsprechend der Druckverteilung.



trieb für einen Tragflächenabschnitt mit der Breite 1 m ist $F = \rho \cdot v \Gamma$.

Dabei ist die Zirkulation $\Gamma = \oint \vec{v} ds$ das Ringintegral über die Geschwindigkeit.

Für eine reibungsfreie Strömung gilt, dass die Zirkulation unabhängig vom Integrationsweg ist. Das ist der Fall, wenn die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Radius R bezüglich des Wirbelkerns gegeben ist durch

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi R}$$

Eine derartige zirkulatorische Strömung, auch Wirbel genannt, ist mit den Euler'schen Gleichungen verträglich. Das hat eine wichtige Konsequenz. Jede Überlagerung einer Potentialströmung mit Wirbeln stellt Lösungen der Euler'schen Gleichungen dar. Auf diese Weise kann man Stromlinienbilder gewinnen, wenn man der berechneten Potentialströmung Wirbel so überlagert, dass die Wirbelkerne auf der Mittellinie des Profils liegen und deren Stärke durch die Randbedingung bestimmt wird, dass die Strömung an der Oberfläche des Profils parallel zur Oberfläche verläuft. Damit lassen sich Strömungsfelder berechnen und aus ihnen die Druckverteilung, der Auftrieb und weiterhin auch die Geschwindigkeitsverteilung ableiten.

Ein allgemeines Resultat dieser Berechnung ist die Formel von KUTTA – JOUKOWSKI. Für manchen Theoretiker ist die Zirkulation der Schlüssel für das Verständnis der Auftriebsentstehung, und es ist zwar falsch aber verständlich, wenn gelegentlich die Zirkulation als *Ursache* für den Auftrieb angegeben wird. Dann ist es auch nicht weit, die Zirkulation als *Ursache* für die Geschwindigkeitsverteilung um das Tragflächenprofil anzugeben. Damit wird aber die physikalische Bedeutung und der Zusammenhang zwischen Zirkulation und Auftrieb eher verdeckt. Deshalb soll hier an eine Überlegung erinnert werden, die auf PRANDTL [11] zurückgeht. Sie verknüpft die Zirkulation mit der vertikalen Impulsänderung der Luftströmung, die von der Tragfläche verursacht wird: Eine Zirkulation entsteht, wenn die Tragfläche den vertikalen Impulsstrom der Luft verändert.

Die Abbildung 14 zeigt eine Tragfläche innerhalb einer geschlossenen Kontrollfläche. Nach einem in der Strömungsdynamik gültigen Lehrsatz ist die Kraft auf einen Körper innerhalb eines Kontrollvolumens bestimmt durch die Summe zweier Beiträge: die Änderung des Impulsflusses der Luft durch das Kontrollvolumen und das Oberflächenintegral über den Druck. Wir betrachten den zweidimensionalen Fall, eine beliebig große Ausdehnung der Spannweite. Die Luftströmung wird durch die Tragfläche nach unten umgelenkt. Um die dadurch verursachte Änderung des vertikalen Impulsflusses zu bestimmen, wird ein Kontrollvolumen betrachtet, das durch zwei Kontrollflächen A und B gebildet wird.

Berechnet man die vertikale Impulsstromänderung, wie in [12] dargestellt, so erhält man die Auftriebsformel von KUTTA – JOUKOSWSKI:

$$F = \rho v_0 \Gamma$$

Der Auftrieb, besser die aerodynamische Querkraft, entspricht genau der Impulsstromänderung der Strömung senkrecht zur ursprünglichen Strömungsrichtung.

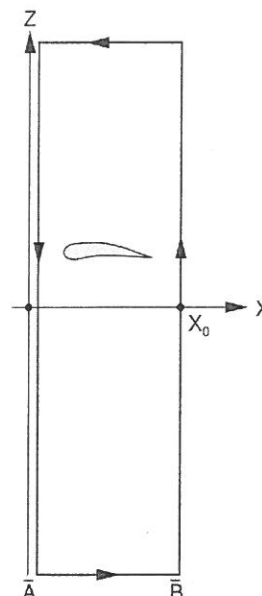


Abb. 14. Tragflächen in einem Kontrollvolumen mit Kontrollfläche A vorn und Kontrollfläche B hinten.

mung senkrecht zur ursprünglichen Strömungsrichtung.

Auftrieb entsteht, wenn die Tragfläche die anströmende Luft nach unten umlenkt. Beschreiben kann man die vertikale Impulsänderung durch den Begriff der Zirkulation.

5.2 Entstehung der Zirkulation

Die Entstehung der Zirkulation kann auf zwei Wegen verstanden werden.

Globale Betrachtung (wie in 5.1): Hier entspricht der Auftrieb genau der vertikalen Impulsstromänderung senkrecht zur ursprünglichen Strömungsrichtung. Auftrieb entsteht, wenn die Tragfläche die anströmende Luft nach unten umlenkt. Mathematisch beschreiben wird die vertikale Impulsstromänderung durch das Produkt aus Geschwindigkeit und Zirkulation. Die Zirkulation ist somit Konsequenz des Auftriebs, nicht dessen Ursache.

Lokale Betrachtung: Hier wird die Umströmung in der Umgebung des Profils betrachtet. Die Umlenkung der Luftströmung durch die Tragfläche führt zu Normalbeschleunigungen und einer Druckdifferenz zwischen Ober- und Unterseite. Eine Folge dieser Druckdifferenz sind Geschwindigkeitsdifferenzen. Die Zirkulation ist ein auf die Tragflächentiefe bezogenes Maß für die mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen. Auch hier ist die Zirkulation Konsequenz der Druckdifferenz, nicht aber deren Ursache.

Beide Zugänge sind gleichwertig und hängen miteinander zusammen. Gemäß den Euler'schen Gleichungen gilt für das Strömungsfeld, dass die Zirkulation vom Weg unabhängig ist und bei reibungsfreier Strömung konstant bleibt. Wir können also das auf die Zirkulation führende Linienintegral sowohl direkt um die Tragfläche herum legen (Lokale Betrachtung) oder aber auch über eine schlanke hohe Kontrollfläche er-

strecken (Globale Betrachtung). In beiden Fällen ist die Zirkulation nicht die Ursache sondern die Konsequenz des Auftriebs. Auch der Versuch, Druckdifferenzen mit Hilfe der Zirkulation in Verbindung mit dem Bernoulli'schen Gesetz zu begründen muss scheitern. Zur Rolle des Anfahrwirbels: Anfahrwirbel entstehen, weil die Helmholtz'schen Wirbelgesetze gelten. Das bedeutet, wenn die Tragfläche Auftrieb und damit Zirkulation erzeugt, entsteht gleichzeitig ein Gegenwirbel. Den Anfahrwirbel als Ursache für die Zirkulationsströmung um die Tragfläche anzugeben wie in [5], ist falsch. Der Schlüssel zum Verständnis der Zirkulation ist der Auftrieb.

6 Strömungsfeld und Wirbelsystem

Betrachtet man die gesamte durch eine endliche Tragfläche erzwungene Ausweichströmung, muss das Bild ergänzt werden. Wenn an der Tragflächenoberseite Unterdruck und an der Tragflächenunterseite Überdruck herrscht, werden dadurch auch Luftbewegungen nach der Seite und – neben den Tragflächenenden – nach oben hervorgerufen. Es bilden sich Wirbel aus, die induzierte Wirbel genannt werden (Abb. 15).

Die Wirbel an den beiden Tragflächen sind gegenläufig. Das Wirbelsystem bewegt sich hinter dem Flugzeug im Mittel nach unten. Die nach unten gerichteten Geschwindigkeitskomponenten der von den Tragflächen nach unten beschleunigten Luftmassen überwiegen bei weitem. Die Aufwärtsbewegung neben den Tragflächenspitzen kann mit der in Abschnitt 3 beschriebenen Bewegungssonde demonstriert werden. Dazu muss man die positiv angestellte Tragfläche auf gleicher Höhe neben der Sonde horizontal vorbeiführen. Die Sonde bewegt sich dann leicht nach oben.

7 Schlussbemerkung

In der konventionellen Erklärung des aerodynamischen Auftriebs sind *Ursache* und *Wirkung* vertauscht. Eine höhere Strömungsgeschwindigkeit an der Tragflächenoberseite ist nicht die *Ursache*, sondern die *Folge* des Unterdrucks. Aus dieser Vertauschung resultieren dann alle weiteren Unzulänglichkeiten und Fehlaussagen sowie die irriige Begründung von Geschwindigkeitsdifferenzen mit Hilfe von Weglängenbetrachtungen. Global verstehen lässt sich die Wirkung der Tragfläche, wenn man die von ihr hervorgerufene Vertikalbeschleunigung von Luftmassen betrachtet. Im Unterricht sollten Rückstoßbetrachtungen infolge der Trägheit der Luft zu Beginn im Vordergrund stehen. Sie erlauben ein Verständnis aller wesentlichen Zusammenhänge der Flugphysik. Die Auftriebsentstehung kann für den Schüler mit Alltagserfahrungen verknüpft werden und es ihm so erleichtern, das Phänomen des Fliegens wirklich zu verstehen. Günstig ist auch, dass alle wesentlichen Zusammenhänge aus einem einheitlichen Ansatz heraus entwickelt sind. Für das Verständnis der Details und insbesondere der Erzeugung von Über- und Unterdruck muss die Beschleunigung der Luftvolumina senkrecht zu den Stromlinien analysiert werden. Will man die Verteilung von Druck und Kräften bei einem Tragflächenprofil verstehen, ist die Krümmungsanalyse von Stromlinienbildern instruktiv und hilfreich. Vor allem für den Lehrer selbst ist wichtig zu wissen, welche Rolle die Zirkulation in den Betrachtungen spielt. Zirkulation ist nicht Ursache für den Auftrieb, sondern sie entsteht bei der Erzeugung von Auftrieb durch die Tragfläche. Der Auftrieb ist die Folge der Vertikalbeschleunigung von Luft durch die geometrische Form und den Anstellwinkel der Tragfläche. Damit wird Zirkulation verursacht und zwar dauernd und mit wechselnder Größe je nach Flugsituation. Der Anfahrwirbel ist eine Bestätigung der Helmholtz'schen Wirbelsätze, nicht aber Ursache der Zirkulation.

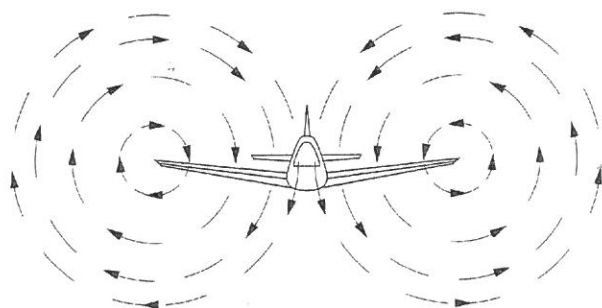


Abb. 15. Strömung und Wirbelsystem hinter einem Flugzeug. Die Länge der Pfeile entspricht der Geschwindigkeit.

gung von Luftmassen betrachtet. Im Unterricht sollten Rückstoßbetrachtungen infolge der Trägheit der Luft zu Beginn im Vordergrund stehen. Sie erlauben ein Verständnis aller wesentlichen Zusammenhänge der Flugphysik. Die Auftriebsentstehung kann für den Schüler mit Alltagserfahrungen verknüpft werden und es ihm so erleichtern, das Phänomen des Fliegens wirklich zu verstehen. Günstig ist auch, dass alle wesentlichen Zusammenhänge aus einem einheitlichen Ansatz heraus entwickelt sind.

Für das Verständnis der Details und insbesondere der Erzeugung von Über- und Unterdruck muss die Beschleunigung der Luftvolumina senkrecht zu den Stromlinien analysiert werden. Will man die Verteilung von Druck und Kräften bei einem Tragflächenprofil verstehen, ist die Krümmungsanalyse von Stromlinienbildern instruktiv und hilfreich.

Vor allem für den Lehrer selbst ist wichtig zu wissen, welche Rolle die Zirkulation in den Betrachtungen spielt. Zirkulation ist nicht Ursache für den Auftrieb, sondern sie entsteht bei der Erzeugung von Auftrieb durch die Tragfläche. Der Auftrieb ist die Folge der Vertikalbeschleunigung von Luft durch die geometrische Form und den Anstellwinkel der Tragfläche. Damit wird Zirkulation verursacht und zwar dauernd und mit wechselnder Größe je nach Flugsituation. Der Anfahrwirbel ist eine Bestätigung der Helmholtz'schen Wirbelsätze, nicht aber Ursache der Zirkulation.

Literatur

- [1] N. F. SMITH: Bernoulli and Newton and Fluidmechanics. – In: The Physics Teacher (1972) Nr. 10, 451–455.
- [2] N. H. FLETCHER: Mechanics of Flight. – In: Physics Education (1975) 385–389.
- [3] K. WELTNER: Der aerodynamische Auftrieb – ein Vergleich unterschiedlicher Erklärungsmuster. – MNU 40 (1987) Nr. 5, 264–272.
- [4] D. ANDERSON – S. EBERHARDT: Understanding Flight. – New York: Mc. Graw-Hill 2001.
- [5] R. WODZINSKI – A. ZIEGLER: Erklärung des Fliegens in der Schule. – MNU 53 (2000) Nr.5, 273–281.
- [6] H. DANIEL: Physik 1. – Berlin, New York: De Gruyter 1997.
- [7] R. SEXL – I. RAAB – E. STREERUWITZ: Das mechanische Universum. Band 1. – Frankfurt, Salzburg: Sauerländer 1996.
- [8] GERTHSEN – KNESER – VOGEL: Physik. – Heidelberg: Springer 2000.
- [9] K. WELTNER: Flugphysik. – Köln: Aulis 2001.
- [10] H. SCHLICHTING – E. TUCKENBRODT: Aerodynamik des Flugzeuges. – Berlin: Springer 1967.
- [11] L. PRANDTL: Führer durch die Strömungslehre. – Braunschweig: Vieweg 1932.
- [12] K. WELTNER: Zur Darstellung des aerodynamischen Auftriebs – Zusammenhang zwischen der Formel von Kutta – Joukowski und der Impulsänderung einer Luftströmung. – In: Physik und Didaktik (1991) 183–195.

Prof. Dr. KLAUS WELTNER ist Hochschullehrer für Didaktik der Physik an der Universität Frankfurt und an der Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasilien. Arbeitsschwerpunkte: Behandlung technischer Sachverhalte im Physikunterricht, Anwendung der Informationstheorie bei der Analyse von Lehr- und Lernprozessen, Flugphysik, Theorie und Praxis der Entwicklung von Studienunterstützungen, Entwicklung von Demonstrationsexperimenten. Weltner@em.uni-frankfurt.de

strecken (Globale Betrachtung). In beiden Fällen ist die Zirkulation nicht die Ursache sondern die Konsequenz des Auftriebs. Auch der Versuch, Druckdifferenzen mit Hilfe der Zirkulation in Verbindung mit dem Bernoulli'schen Gesetz zu begründen muss scheitern. Zur Rolle des Anfahrwirbels: Anfahrwirbel entstehen, weil die Helmholtz'schen Wirbelgesetze gelten. Das bedeutet, wenn die Tragfläche Auftrieb und damit Zirkulation erzeugt, entsteht gleichzeitig ein Gegenwirbel. Den Anfahrwirbel als Ursache für die Zirkulationsströmung um die Tragfläche anzugeben wie in [5], ist falsch. Der Schlüssel zum Verständnis der Zirkulation ist der Auftrieb.

6 Strömungsfeld und Wirbelsystem

Betrachtet man die gesamte durch eine endliche Tragfläche erzwungene Ausweichströmung, muss das Bild ergänzt werden. Wenn an der Tragflächenoberseite Unterdruck und an der Tragflächenunterseite Überdruck herrscht, werden dadurch auch Luftbewegungen nach der Seite und – neben den Tragflächenenden – nach oben hervorgerufen. Es bilden sich Wirbel aus, die induzierte Wirbel genannt werden (Abb. 15). Die Wirbel an den beiden Tragflächen sind gegenläufig. Das Wirbelsystem bewegt sich hinter dem Flugzeug im Mittel nach unten. Die nach unten gerichteten Geschwindigkeitskomponenten der von den Tragflächen nach unten beschleunigten Luftmassen überwiegen bei weitem. Die Aufwärtsbewegung neben den Tragflächenspitzen kann mit der in Abschnitt 3 beschriebenen Bewegungsprobe demonstriert werden. Dazu muss man die positiv angestellte Tragfläche auf gleicher Höhe neben der Sonde horizontal vorbeiführen. Die Sonde bewegt sich dann leicht nach oben.

7 Schlussbemerkung

In der konventionellen Erklärung des aerodynamischen Auftriebs sind *Ursache* und *Wirkung* vertauscht. Eine höhere Strömungsgeschwindigkeit an der Tragflächenoberseite ist nicht die *Ursache*, sondern die *Folge* des Unterdrucks. Aus dieser Vertauschung resultieren dann alle weiteren Unzulänglichkeiten und Fehlaussagen sowie die irriige Begründung von Geschwindigkeitsdifferenzen mit Hilfe von Weglängenbetrachtungen. Global verstehen lässt sich die Wirkung der Tragfläche, wenn man die von ihr hervorgerufene Vertikalbeschleunigung von Luftmassen betrachtet. Im Unterricht sollten Rückstoßbetrachtungen infolge der Trägheit der Luft zu Beginn im Vordergrund stehen. Sie erlauben ein Verständnis aller wesentlichen Zusammenhänge der Flugphysik. Die Auftriebsentstehung kann für den Schüler mit Alltagserfahrungen verknüpft werden und es ihm so erleichtern, das Phänomen des Fliegens wirklich zu verstehen. Günstig ist auch, dass alle wesentlichen Zusammenhänge aus einem einheitlichen Ansatz heraus entwickelt sind. Für das Verständnis der Details und insbesondere der Erzeugung von Über- und Unterdruck muss die Beschleunigung der Luftvolumina senkrecht zu den Stromlinien analysiert werden. Will man die Verteilung von Druck und Kräften bei einem Tragflächenprofil verstehen, ist die Krümmungsanalyse von Stromlinienbildern instruktiv und hilfreich. Vor allem für den Lehrer selbst ist wichtig zu wissen, welche Rolle die Zirkulation in den Betrachtungen spielt. Zirkulation ist nicht Ursache für den Auftrieb, sondern sie entsteht bei der Erzeugung von Auftrieb durch die Tragfläche. Der Auftrieb ist die Folge der Vertikalbeschleunigung von Luft durch die geometrische Form und den Anstellwinkel der Tragfläche. Damit wird Zirkulation verursacht und zwar dauernd und mit wechselnder Größe je nach Flugsituation. Der Anfahrwirbel ist eine Bestätigung der Helmholtz'schen Wirbelsätze, nicht aber Ursache der Zirkulation.

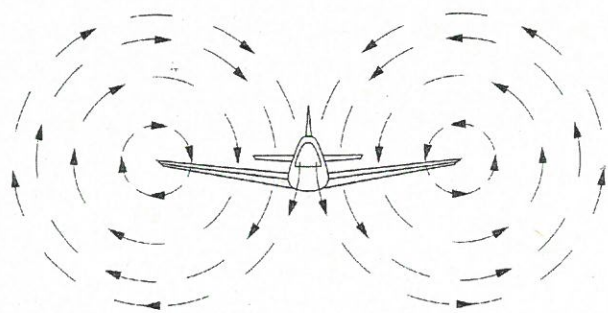


Abb. 15. Strömung und Wirbelsystem hinter einem Flugzeug. Die Länge der Pfeile entspricht der Geschwindigkeit.

Im Unterricht sollten Rückstoßbetrachtungen infolge der Trägheit der Luft zu Beginn im Vordergrund stehen. Sie erlauben ein Verständnis aller wesentlichen Zusammenhänge der Flugphysik. Die Auftriebsentstehung kann für den Schüler mit Alltagserfahrungen verknüpft werden und es ihm so erleichtern, das Phänomen des Fliegens wirklich zu verstehen. Günstig ist auch, dass alle wesentlichen Zusammenhänge aus einem einheitlichen Ansatz heraus entwickelt sind.

Für das Verständnis der Details und insbesondere der Erzeugung von Über- und Unterdruck muss die Beschleunigung der Luftvolumina senkrecht zu den Stromlinien analysiert werden. Will man die Verteilung von Druck und Kräften bei einem Tragflächenprofil verstehen, ist die Krümmungsanalyse von Stromlinienbildern instruktiv und hilfreich.

Vor allem für den Lehrer selbst ist wichtig zu wissen, welche Rolle die Zirkulation in den Betrachtungen spielt. Zirkulation ist nicht Ursache für den Auftrieb, sondern sie entsteht bei der Erzeugung von Auftrieb durch die Tragfläche. Der Auftrieb ist die Folge der Vertikalbeschleunigung von Luft durch die geometrische Form und den Anstellwinkel der Tragfläche. Damit wird Zirkulation verursacht und zwar dauernd und mit wechselnder Größe je nach Flugsituation. Der Anfahrwirbel ist eine Bestätigung der Helmholtz'schen Wirbelsätze, nicht aber Ursache der Zirkulation.

Literatur

- [1] N. F. SMITH: Bernoulli and Newton and Fluidmechanics. – In: The Physics Teacher (1972) Nr. 10, 451–455.
- [2] N. H. FLETCHER: Mechanics of Flight. – In: Physics Education (1975) 385–389.
- [3] K. WELTNER: Der aerodynamische Auftrieb – ein Vergleich unterschiedlicher Erklärungsmuster. – MNU 40 (1987) Nr. 5, 264–272.
- [4] D. ANDERSON – S. EBERHARDT: Understanding Flight. – New York: Mc. Graw-Hill 2001.
- [5] R. WODZINSKI – A. ZIEGLER: Erklärung des Fliegens in der Schule. – MNU 53 (2000) Nr.5, 273–281.
- [6] H. DANIEL: Physik 1. – Berlin, New York: De Gruyter 1997.
- [7] R. SEXL – I. RAAB – E. STREERUWITZ: Das mechanische Universum. Band 1. – Frankfurt, Salzburg: Sauerländer 1996.
- [8] GERTHSEN – KNESER – VOGEL: Physik. – Heidelberg: Springer 2000.
- [9] K. WELTNER: Flugphysik. – Köln: Aulis 2001.
- [10] H. SCHLICHTING – E. TUCKENBRODT: Aerodynamik des Flugzeuges. – Berlin: Springer 1967.
- [11] L. PRANDTL: Führer durch die Strömungslehre. – Braunschweig: Vieweg 1932.
- [12] K. WELTNER: Zur Darstellung des aerodynamischen Auftriebs – Zusammenhang zwischen der Formel von Kutta – Joukowski und der Impulsänderung einer Luftströmung. – In: Physik und Didaktik (1991) 183–195.

Prof. Dr. KLAUS WELTNER ist Hochschullehrer für Didaktik der Physik an der Universität Frankfurt und an der Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasilien. Arbeitsschwerpunkte: Behandlung technischer Sachverhalte im Physikunterricht, Anwendung der Informationstheorie bei der Analyse von Lehr- und Lernprozessen, Flugphysik, Theorie und Praxis der Entwicklung von Studienunterstützungen, Entwicklung von Demonstrationsexperimenten. Weltner@em.uni-frankfurt.de