

Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?

Versuch einer Analyse verschiedener Erklärungsmuster

Rita Wodzinski

1. Einleitung

Obwohl das Fliegen mit dem Flugzeug heute nichts Ungewöhnliches mehr ist, hat das Phänomen "Fliegen" an Faszination kaum etwas verloren. Ein guter Grund eigentlich, das Fliegen auch im Schulunterricht zu thematisieren. Geht man aber der Frage nach, warum ein Flugzeug fliegt, stellt man fest, daß es offenbar ganz verschiedene Antworten auf diese Frage gibt. Merkwürdig daran ist, daß jede dieser Erklärungen bis zu einem gewissen Grad überzeugen kann, aber die Zusammenhänge völlig unklar bleiben. Dieser Beitrag möchte deshalb helfen, die verschiedenen Erklärungen in einen größeren Rahmen einzubetten. Im zweiten Teil werden darauf aufbauend Vorschläge für einen alternativen Unterricht zur Flugphysik dargestellt. (Eine etwas ausführlichere Darstellung der fachlichen Analyse findet man unter [1].)

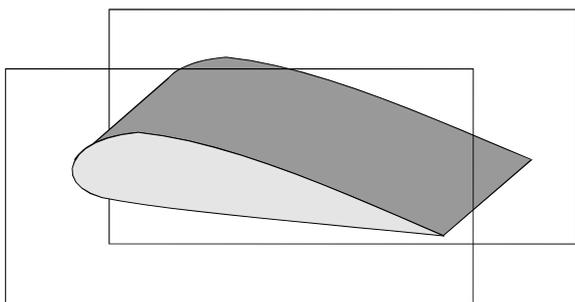


Abb. 1: Modell einer zweidimensionalen Tragfläche

2. Warum fliegt ein Flugzeug: Die drei häufigsten Erklärungen

Eines der drei häufigsten Erklärungsmuster zum Fliegen ist die Druckerklärung. Demnach wird durch die besondere Form des Tragflügels die Strömung so verändert, daß an der Oberseite ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck entsteht. Die Druckdifferenz liefert dann die Auftriebskraft, die das Flugzeug in der Luft hält. Dieses Erklärungsmuster findet man bevorzugt in populärwissenschaftlichen Büchern und Zeitschriften oder in Kinderbüchern.

Ein anderes Erklärungsmuster, die Rückstoßerklärung, knüpft an das Wechselwirkungsgesetz an. Hervorgehoben wird, daß die Tragfläche Luft nach unten umlenkt. Dabei muß die Tragfläche nach dem Wechselwirkungsgesetz eine nach oben gerichtete Kraft erfahren. Dieses Erklärungsmuster wird vor allem von Weltner propagiert (z.B. [2]) und hat inzwischen Einzug in eine Reihe von Schulbüchern gefunden.

Ein drittes Erklärungsmuster vergleicht den Auftrieb mit der Kraft auf den rotierenden Zylinder. Es findet sich z.B. im

Gerthsen [3] und in vielen Lehrbüchern der Technischen Strömungslehre. Ähnlich wie ein rotierender Zylinder eine Kraft erfährt, weil zur normalen Umströmung eine Kreisströmung (Zirkulationsströmung) hinzukommt, wird auch der Auftrieb auf eine Zirkulationsströmung um die Tragfläche herum zurückgeführt.

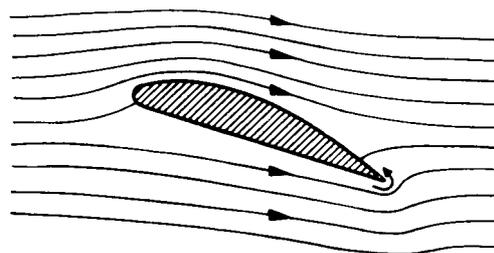


Abb. 2: Strömungsbild einer Tragfläche ohne Zirkulation (nach [4, S. 108]).
Hier entsteht kein Auftrieb.

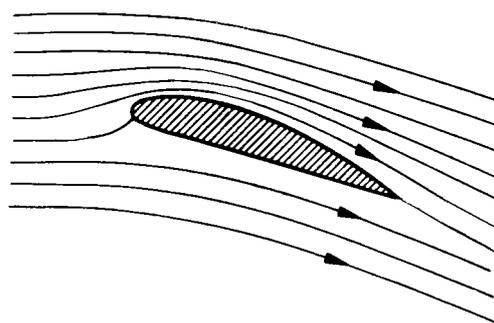


Abb. 3: Strömungsbild einer Tragfläche mit Zirkulation (nach [4, S. 107]).
Hier entsteht Auftrieb.

3. Fachliche Analyse des Zusammenspiels der drei Erklärungen

3.1. Der zweidimensionale Fall

Aus der Sicht der Strömungsmechanik ist tatsächlich die Zirkulation der Schlüssel zur Beschreibung des Auftriebs. In einer ersten guten Näherung kann man den Auftrieb zunächst für eine zweidimensionale Tragfläche in einem idealen reibungsfreien Fluid untersuchen. Eine zweidimensionale Tragfläche kann man sich vorstellen als ein Tragflächenstück, dessen Enden mit Platten versehen sind, die eine Querströmung unterbinden (Abb. 1). Das Strömungsbild einer solchen Tragfläche ohne Zirkulation gibt Abb. 2 wieder. Würde die Luft so strömen, wäre der Auftrieb allerdings null. Wie die Strömung real aussieht, zeigt im Vergleich dazu Abb. 3. Der Unterschied in den Strömungsbildern läßt sich nun durch die Zirkulationsströmung beschreiben, in der sämtliche Auftriebsinformation enthalten ist (Abb. 4). Das gleiche gilt auch für den rotierenden Zylinder. Auch hier steckt die Auftriebsinformation in der

Dr. Rita Wodzinski, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Schellingstr. 4, D-80799 München

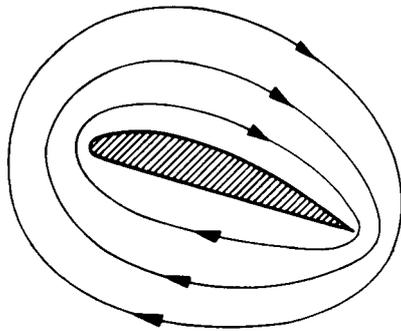


Abb. 4: Strömungsbild der Zirkulationsströmung (nach [4, S. 108]). Man erhält dieses Bild durch Subtraktion der Strömungsbilder in Abb. 3 und 2.

Kreisströmung. In beiden Fällen berechnet sich der Auftrieb nach derselben Gleichung, nämlich der Kutta-Joukowski-Formel: $F/l = \Gamma \rho u$, wobei u die ungestörte Anströmgeschwindigkeit bezeichnet und Γ die Stärke der Zirkulation.

Damit ist bereits eine erste Verknüpfung der drei Erklärungsmuster gefunden. Denn beschreibt man das Strömungsbild einer Tragfläche mit Hilfe der Zirkulationsströmung, so beinhaltet das automatisch auch, daß die Strömung oberhalb der Tragfläche schneller und unterhalb der Tragfläche langsamer ist als die ungestörte Strömung und daß die Luft hinter der Tragfläche nach unten umgelenkt wird.

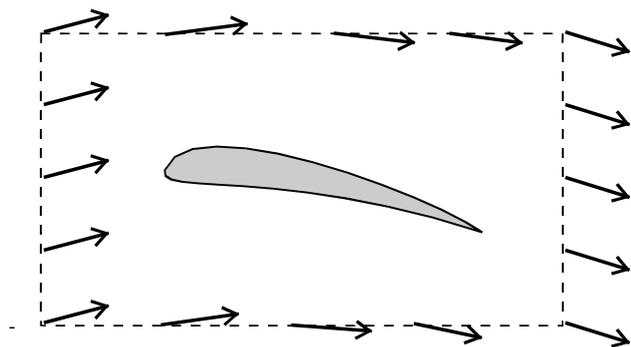


Abb. 5: Skizze zum Impulssatz: Das Kontrollvolumen ist gestrichelt dargestellt. Die Kraft auf die Tragfläche ergibt sich aus der Differenz zwischen ein- und ausströmendem Impulsstrom (Impulsanteil) plus den Druckkräften an den Rändern des Kontrollvolumens (Druckanteil).

Eine Verknüpfung theoretischer Art liefert der Impulssatz. Der Impulssatz besagt: Wenn eine stationäre Strömung vorliegt, kann man die Kraft auf einen Körper in der Strömung bestimmen, indem man ein beliebiges Kontrollvolumen um den Körper legt und ein- und ausströmenden Impuls und den Druck an den Grenzflächen des Kontrollvolumens auswertet. Egal wie man das Kontrollvolumen legt, immer kommt die Auftriebskraft heraus (Abb. 5). Wählt man z.B. ein quadratisches Kontrollvolumen beliebiger Größe, dann liefert der Druck- und der Impulsanteil jeweils die Hälfte des Auftriebs. Wählt man das Kontrollvolumen so, daß es direkt um die Tragfläche herum liegt, ist der Impulsanteil null und der Druckanteil macht den gesamten Auftrieb aus. Ein anderer Grenzfall ist ein Kontrollvolumen, das symmetrisch um die Tragfläche herum liegt und oben und unten ins Unendliche reicht. Jetzt kann man die Druckanteile vernachlässigen, und nur der Impulsanteil oder die Luftumlenkung vorne und hinten bestimmt den Auftrieb. Die Druckerklärung und die Rückstoßerklärung sind also so

gesehen einfach zwei verschiedene Spezialfälle des Impulssatzes. Und natürlich gilt: Wendet man den Impulssatz auf eine zweidimensionale Tragfläche an, dann liefert er für den Auftrieb genau die Kutta-Joukowski-Formel.

3.2. Der dreidimensionale Fall

Die bisherigen Überlegungen betrafen eine zweidimensionale Tragfläche. Was passiert nun, wenn man zu einer dreidimensionalen Tragfläche übergeht? Leider werden die Zusammenhänge nun erheblich komplizierter, denn es müssen jetzt die sogenannten Randwirbel mitberücksichtigt werden, die an den Flügelenden austreten und die den Abwind hinter der Tragfläche wesentlich beeinflussen.

Vereinfacht gesagt kann der Wirbelfaden, um den die Luft bei der Zirkulationsströmung herumströmt, an den Flügelenden nicht aufhören, sondern muß weitergeführt werden, im Prinzip bis hin zum Startpunkt des Flugzeugs. Diese Randwirbel sorgen für zusätzlichen Abwind hinter der Tragfläche, der dem Abwind vom eigentlichen tragenden Wirbel überlagert ist (Abb. 6).

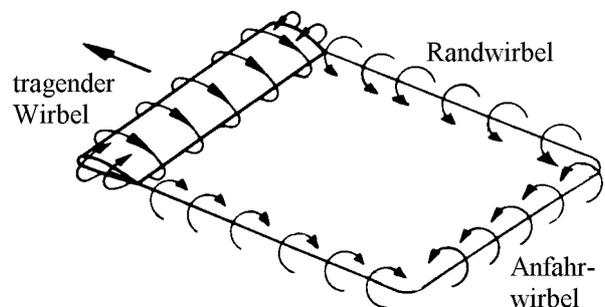


Abb. 6: Im dreidimensionalen Fall müssen zusätzlich zum tragenden Wirbel auch die Randwirbel berücksichtigt werden. Sie schaufeln hinter der Tragfläche zusätzlich Luft nach unten (nach [4, S. 126]).

Daß im dreidimensionalen Fall überhaupt Randwirbel entstehen, kann man folgendermaßen verstehen: Bei einer zweidimensionalen Tragfläche gibt es Unterdruck oben und Überdruck unten und keine Möglichkeit des Ausgleichs. Betrachtet man aber einen dreidimensionalen Flügel, dann müssen sich die Druckgebiete zum Rand hin ausgleichen. Die Luft strömt deshalb auf der Oberseite der Tragfläche immer etwas zum Flugzeugrumpf hin und auf der Unterseite etwas zu den Flügelspitzen hin. Diese Querströmungen auf beiden Seiten der Tragfläche sorgen dafür, daß sich an der gesamten Hinterkante Wirbel ausbilden, die zusammen eine sogenannte Wirbelschleppe formen. Die Wirbelschleppe rollt sich aber in einiger Entfernung hinter der Tragfläche zu zwei starken Wirbeln auf, so daß die vereinfachte Betrachtung zweier an den Enden austretender Wirbelfäden (wie in Abb. 6) berechtigt erscheint.

Für ein bestimmtes Profil läßt sich genau berechnen, welchen Beitrag die Randwirbel zur Abwindgeschwindigkeit hinter der Tragfläche liefern. In der Abb. 7 ist das Ergebnis einer solchen Rechnung (für ein elliptisches Profil) dargestellt, und zwar sind die beiden Anteile des Abwindes, die vom Wirbel um die Tragfläche bzw. von der Wirbelschleppe herrühren, getrennt aufgetragen. Man sieht daran, daß der Randwirbelabwind bereits kurz hinter der Tragfläche den größten Teil des Abwindes ausmacht. Das bedeutet: Hinter der Tragfläche erfolgt die Umlenkung der Luft nach unten vor allem durch die Randwirbel,

die aber zum Auftrieb nichts beitragen. Der Abwind im dreidimensionalen Fall ist also offenbar etwas sehr viel Komplexeres, als ein schlichtes Anpassen des Luftstroms an die Profilform, wie es bei der Rückstoßklärung suggeriert wird.

Eindrucksvolle Fotos zu den Randwirbeln wie in Abb. 8 findet man im internet z.B. unter [5, Bild vom 11. Oktober 96 oder 23. Oktober 95].

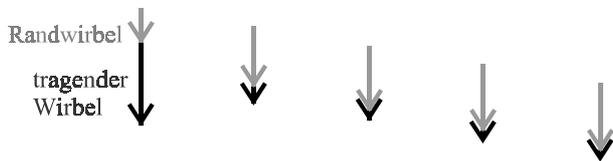


Abb. 7: Die Abwindgeschwindigkeit hinter der Tragfläche setzt sich zusammen aus einem Anteil, der vom tragenden (auftriebserzeugenden) Wirbel herrührt, und einem Anteil, der auf die Randwirbel zurückzuführen ist. Schon in geringer Entfernung hinter der Tragfläche wird das Abwindverhalten wesentlich von den Randwirbeln bestimmt.



Abb. 8: Das Flugzeug fährt im Landeanflug über einen Behälter, aus dem Rauch entweicht. Das Bild zeigt, wie die Randwirbel den Rauch entgegen dem Uhrzeigersinn herumschleudern.

3.3. Warum also fliegt ein Flugzeug?

Will man verstehen, warum ein Flugzeug fliegt, muß man untersuchen, warum sich eigentlich das Stromlinienbild so einstellt, wie es sich einstellt, denn geht man von einem Stromlinienbild als gegeben aus, ist darin alle Auftriebsinformation ja bereits enthalten.

Eine gute Begründung, warum sich an der Tragflächenoberseite ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck einstellt, gibt es außer über die Zirkulation nicht. Oft wird argumentiert, an der Oberseite müsse ein Unterdruck vorherrschen, weil die Luft an der Oberseite einen längeren Weg zurücklegen muß bis zum gemeinsamen Treffpunkt an der Hinterkante. Dies ist aber ein Mißverständnis. Die Luft trifft sich tatsächlich nicht an der Hinterkante, wie das Ergebnis einer Simulation deutlich zeigt (Abb. 9) [6].

Bei der Rückstoßklärung wird die Frage, warum die Luft nach unten umgelenkt wird, gar nicht erst gestellt. Es wird als selbstverständlich vorausgesetzt, daß das so ist, weil die Luft dem Profil ausweichen muß. Wie die Ausführungen gezeigt haben, kommt der überwiegende Teil der Luftumlenkung allerdings durch andere Effekte zustande.

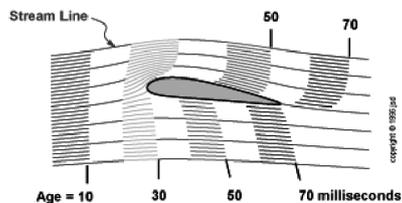


Abb. 9: Der zeitliche Verlauf der Strömung an Ober- und Unterseite kann durch die unterschiedlichen Grautöne verfolgt werden. Beide Luftströme treffen sich nicht an der Hinterkante.

Nur in der Zirkulationserklärung hat die Frage, warum sich die Strömung so ausbildet, einen sinnvollen Platz. Man kann die Entstehung der Zirkulationsströmung etwa folgendermaßen verstehen: Wenn der Tragflügel sich zu bewegen beginnt, dann strömt die Luft im ersten Moment so, wie es einer zirkulationsfreien Umströmung entspricht. D.h. die Luft strömt um die Hinterkante herum zum oberen Staupunkt. Dies kann man für kleine Strömungsgeschwindigkeiten experimentell auch zeigen. Um diesem Strömungsbild zu folgen, muß die Luft an der Hinterkante sehr schnell werden und dann im Staupunkt wieder auf null abgebremst werden. Die Luft in unmittelbarer Nähe vom Tragflügel wird aber durch Reibung mit der Oberfläche verzögert, so daß sie der Bewegung um die Hinterkante herum ab einer bestimmten Geschwindigkeit nicht mehr folgen kann. Sie löst sich deshalb an der Hinterkante vom Flügel ab. Die weiter außen liegende Luftschicht ist durch Reibung weniger abgebremst. Sie folgt deshalb noch der Bewegung um die Kante herum. Dadurch kommt es zu einem Aufrollvorgang und der Entstehung des Anfahrwirbels. Experimentell kann man diesen Anfahrwirbel übrigens sehr leicht sichtbar machen. Man braucht dazu lediglich eine flache wassergefüllte Schale, etwas Sägemehl und ein Tragflächenprofil bzw. ein Modell eines schräg angestellten Bretts, das man durch die Wanne zieht.

Da kein Wirbel ohne Gegenwirbel entsteht, bildet sich ein zweiter Wirbel aus, der sich im günstigen Fall um die Tragfläche herum legt. Dieser Wirbel liefert gerade die für den Auftrieb verantwortliche Zirkulationsströmung.

Ganz entscheidend dafür, daß ein Flugzeug überhaupt fliegen kann, ist also die scharfe Hinterkante des Tragflügels und die Tatsache, daß Luft ein reales und kein ideales Fluid ist.

4. Ein alternativer Unterrichtsvorschlag

4.1. Der unterrichtliche Rahmen

Eine tiefere Behandlung der Physik des Fliegens im Unterricht ist nur sinnvoll, wenn man sie in eine Unterrichtsreihe zur Strömungslehre einbettet. Größere Themenbereiche, die sich neben dem Fliegen in einem solchen Unterricht diskutieren lassen, sind z.B. die Fahrzeugumströmung, die Aerodynamik im Sport oder Themen aus der Bionik wie besonders strömungsgünstige Formen und Oberflächen in der Natur. Daneben gibt es noch eine Vielzahl von weiteren Phänomenen wie die Dellen im Golfball, die tropfende Teekanne, das Abdecken von Dächern, Blutströmungen in Adern um nur einige zu nennen. Auf diese Weise bleiben die Erkenntnisse, die bei der Flugphysik von Bedeutung sind, nicht auf diesen Bereich beschränkt, sondern werden genutzt, um damit einen größeren Bereich von interessanten Phänomenen zu erschließen.

4.2. Eine erste Erklärung über den Druck

Um das Phänomen des Auftriebs an Tragflächen experimentell deutlich zu machen, kann man ein Flugzeugmodell auf einer Waage mit dem Fön anblasen und den scheinbaren Gewichtsverlust beobachten. Besonders gut eignen sich dafür einfache Styropormodelle. Mit ihnen kann man Auftriebskräfte erzeugen, die deutlich größer sind als die Gewichtskraft. Experimentell kann man zeigen, daß es einen bestimmten Anstellwinkel gibt, bei dem der Auftrieb maximal wird. Er liegt deutlich unter 45 Grad. Auch bei einem echten Flugzeug muß die Luft eine Kraft ausüben, die der Gewichtskraft des Flugzeugs entspricht und auch beim richtigen Flugzeug kommt es auf den Anstellwinkel an.

Bittet man die Schülerinnen und Schüler, ein Stromlinienbild für die Umströmung einer Tragfläche zu zeichnen, werden sie vermutlich intuitiv das Wesentliche bereits richtig aufzeichnen, nämlich die Verengung der Stromlinien an der Oberseite, die Erweiterung an der Unterseite und das glatte Abströmen an der Hinterkante. Mit der zuvor qualitativ diskutierten Bernoulli-Gleichung kann man diesem Bild entnehmen, daß an der Oberseite der Tragfläche ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck vorliegt. Diese Druckdifferenz entspricht dem Auftrieb. Wenn die notwendigen Geräte zur Verfügung stehen, können detailliertere Druckmessungen im Experiment durchgeführt werden. Alternativ dazu muß man sich mit entsprechenden Grafiken (Abb. 10) begnügen, die belegen, daß die Oberseite entgegen der Erwartung einen deutlich größeren Beitrag zum Auftrieb liefert als die Unterseite.

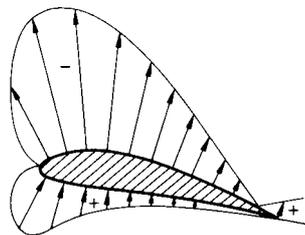


Abb. 10: Druckverteilung an Ober- und Unterseite (aus [4, S. 116]). Die Oberseite trägt etwa mit zwei Drittel zum gesamten Auftrieb bei.

Eine erste Erklärung des Fliegens über die Druckunterschiede ist damit gefunden. Als nächstes kann man die Frage stellen, warum eigentlich die Luft an der Oberseite schneller strömt als an der Unterseite. Dazu können verschiedene Ideen von Schülerseite zusammengetragen und kritisch überprüft werden. Insbesondere sollte man auf die Ungültigkeit des Weglängenarguments explizit hinweisen. Gegenargumente dagegen sind, daß das Fliegen mit symmetrischen Profilen (z.B. Drachenfliegen) möglich ist, obwohl Ober- und Unterseite gleich lang sind, daß auch Überkopfflug funktioniert, und nicht zuletzt das Ergebnis der Simulation in Abb. 9.

4.3. Aufbrechen der Selbstverständlichkeit des Strömungsbildes einer Tragfläche

Im nachfolgenden Unterrichtsabschnitt geht es darum, deutlich zu machen, daß es keineswegs selbstverständlich ist, daß die Luft an der Hinterkante eines Tragflügels glatt abströmt, wie dies eingangs naiv vorausgesetzt wurde. Dazu werden Stromlinienbilder mit Velourpapier von einer Tragfläche und einem angestellten Brett erzeugt (Abb. 11 und 12). (Man bekommt das Velourpapier in Geschäften für Künstlerbedarf.)

Für die Herstellung dieser Bilder geht man folgendermaßen vor: Man knickt von einem Stück kräftigem Velourpapier (ca. 10 x 20 cm, hochkant, weiche Seite vorne) den oberen Teil (ca. 5 cm) nach hinten. An der neu entstandenen Oberseite macht man in regelmäßigen Abständen kleine vertikale Bleistiftmarkierungen (ca. 5 mm lang). Dann schneidet man aus dem Papier eine Form aus, deren Umströmung untersucht werden soll. Nachdem man das gesamte Papier kurz kräftig naß gemacht hat, hängt man das anfangs umgeknickte hintere Stück in seiner ganzen Länge in ein eckiges randvoll gefülltes Wasserbecken. Mit einem Füllfederhalter zeichnet man nun die Bleistiftmarkierungen in regelmäßigen Abständen (alle 15 sec.) nach. Nach ca. 5 Minuten hat sich die Tinte bis unten durchgefärbt und dabei das Stromlinienbild einer zirkulationsfreien Umströmung aufgezeichnet. (Siehe auch [7].)



Abb. 11: Umströmung eines tragflächenförmigen Lochs mit der Velourpapier-Methode. Das Bild gleicht einer Umströmung einer Tragfläche ohne Zirkulation.

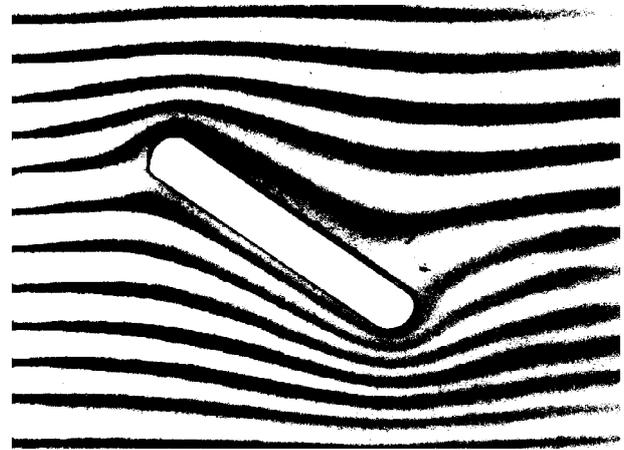


Abb. 12: Zirkulationsfreie Umströmung eines angestellten Bretts, aufgenommen mit der Velourpapier-Methode.

Bei der Durchführung des Experiments fällt die Umströmung der Hinterkante bereits als etwas Überraschendes ins Auge. Der unmittelbare Vergleich zweier Strömungsbilder (wie Abb. 3 und 11) kann die Unterschiede zusätzlich verdeutlichen. An dieser Stelle sollte man die Schülerinnen und Schüler darauf hinweisen, daß bei sehr langsamer Strömung eine Tragfläche tatsächlich so umströmt wird, wie das Velourpapier zeigt, daß dabei aber kein Auftrieb erzeugt wird. Dies kann man erkennen, wenn man sich die Velourpapierströmung der angestellten Platte genauer ansieht. Aufgrund der Symmetrie kann in die-

sem Fall keine resultierende Kraft auftreten, sondern nur Drehmomente, die zu einer Drehung der Platte führen würden.

Weiteren Aufschluß gibt die unterschiedliche Umströmung einer schrägen Platte in Wasser und in Glycerin. Für diesen Versuch füllt man Wasser und Glycerin jeweils in eine transparente Plastikschaale und bestreut die Oberfläche mit Sägemehl. Zieht man eine angestellte Platte abwechselnd durch die beiden Flüssigkeiten, sieht man, daß in Glycerin die Hinterkante wie beim Velourpapier umströmt wird, während in Wasser kein Hochströmen an der Hinterkante zu beobachten ist.

Wie bei der Velourpapierströmung entsteht auch in Glycerin kein Auftrieb. Das kann man zeigen, indem man ein Tragflächenprofil an einem quer gespannten Draht abwechselnd durch ein Becken mit Glycerin und Wasser zieht (Abb. 13). An der Tragfläche sind zwei Ösen so angebracht, daß das Profil sich nur nach oben oder unten bewegen kann. Dadurch wird der Auftrieb unmittelbar in einer Bewegung der Tragfläche deutlich. (Wichtig ist, daß sich die Ösen in der Nähe des Schwerpunktes der Tragfläche befinden.)

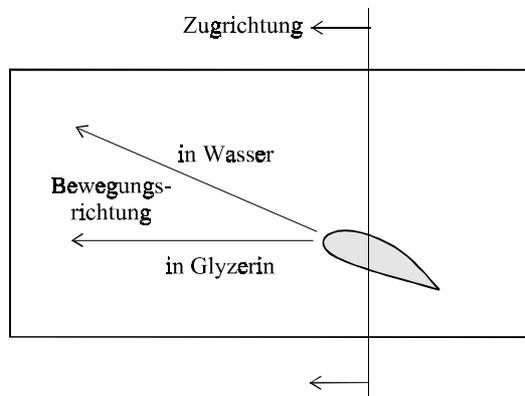


Abb. 13: Versuch zur Untersuchung des Auftriebs in Wasser und Glycerin: Man zieht das Tragflächenprofil an dem quer gespannten Faden durch die mit der jeweiligen Flüssigkeit gefüllte Wanne. Der Faden läuft am Profil durch zwei Ösen, so daß das Profil sich nach oben und unten frei bewegen kann.

Zusammenfassend läßt sich festhalten: Welches Strömungsbild sich einstellt und ob Auftrieb entsteht oder nicht, hängt einerseits von der Geschwindigkeit ab, andererseits aber auch von einer Eigenschaft des Fluids (genauer der Zähigkeit).

4.4. Erklärung des Auftriebs über die Zirkulation

Im nächsten Unterrichtsabschnitt soll der Unterschied in den Strömungsbildern genauer erfaßt und über die Zirkulation beschrieben werden, denn in dem Unterschied steckt offensichtlich die Auftriebsinformation. Vergleicht man die Bilder einer Umströmung ohne und mit Auftrieb, kann man folgende Unterschiede als Hinweise auf die Zirkulation deuten: Es muß zum Strömungsbild der langsamen Umströmung offensichtlich eine Strömung hinzukommen, die die Strömung an der Hinterkante nach unten lenkt, an der Oberseite die Strömung beschleunigt und an der Unterseite verzögert. Dies ist die Zirkulationsströmung. Experimentell läßt sich sehr leicht mit einem Aufbau nach Abb. 14 nachweisen: Zwei dünne Wellpappestreifen sind mit Stecknadeln und Korken horizontal gelagert. Zieht man mit einer Tragfläche zwischen den Streifen hindurch, wird der obere Streifen nach hinten und der untere nach vorn bewegt. Das bedeutet: Die Luft an der Oberseite wird in Strömungsrichtung beschleunigt und an der Unterseite verzögert. Zieht man z.B. einen Zylinder zwischen den Strei-

fen hindurch, bewegen sich beide Zeiger gleichzeitig nach vorn, wie man es aufgrund der Reibung erwarten würde.

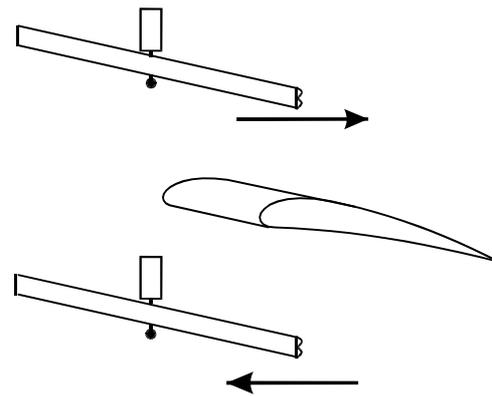


Abb. 14: Versuch zum Nachweis der Zirkulation: Zwei Wellpappestreifen sind mit Korken und Stecknadeln so befestigt, daß sie horizontal frei beweglich sind. Zieht man ein Tragflächenprofil mit genügend großem Anlauf zwischen den Streifen entlang, bewegen sich die Zeiger in die angegebenen Richtungen.

Dieser Versuch vermittelt einen guten Eindruck vom Drehsinn der Zirkulation. Die Frage, die sich nun stellt ist, wie kommt es eigentlich zu dieser Zirkulationsströmung. Dies wird nur über die Entstehung des Anfahrwirbels (siehe oben) verständlich. Zusätzlich muß noch deutlich gemacht werden, daß zu jedem Wirbel immer ein entsprechender Gegenwirbel produziert wird. Dies entspricht dem Drehimpulserhaltungssatz. Das Fazit ist schließlich: Der Auftrieb entsteht, weil an der scharfen Hinterkante des Tragflügels ein Wirbel entsteht und sich ein entsprechender Gegenwirbel um die Tragfläche legt. Notwendig dafür ist letzten Endes auch die Reibung der Luft mit der Tragfläche.

5. Schluß

Der obige Unterrichtsvorschlag legt den Schwerpunkt bei der Behandlung des Themas Fliegens auf die Strömungsphysik. Selbstverständlich ist dies nur eine Möglichkeit, das Fliegen im Unterricht zu thematisieren. Anregungen für andere Vertiefungsmöglichkeiten bietet z.B. die Zusammenstellung in [8].

Literatur

- [1] Wodzinski, R.; Ziegler, A.: *Erklärung des Fliegens in der Schule*. in: MNU (1999) (in Druck)
- [2] Weltner, K.: *Flugphysik im Unterricht*. in: Physik in der Schule 35 (1997) 1, S. 3-9
- [3] Gerthsen-Kneser-Vogel: *Physik*. Springer: Berlin 1982¹⁴
- [4] Dubs, F.: *Aerodynamik der reinen Unterschallströmung*. Birkhäuser: Basel 1990⁶
- [5] <http://www.princeton.edu/~asmits/pow/index.html>
- [6] <http://www.monmouth.com/~jsd/how/htm>
- [7] Wilke, H.-J.; Patzig, W.; Hung, N.N.: *Einige experimentelle Möglichkeiten zur Demonstration und Untersuchung von Stromlinienbildern*. in: Physik in der Schule 36 (1998) 3, S. 96-101
- [8] Hahne, K.: *Fliegen und Flugmodelle. Materialien für einen fachübergreifenden NW-Unterricht*. Soznat: Marburg 1988 (zu bestellen bei: Forum Eltern und Schule, Huckarder Str 12, D-44147 Dortmund)