

Facharbeit

aus dem Fach

Physik

Thema: Der Bernoulli-Effekt

Verfasser: Richard Wittmann

Leistungskurs: Physik

Kursleiter: StD Matthias Salzeder

Abgabetermin: 2. Februar 2004

Erzielte Note: in Worten:

Erzielte Punkte: in Worten:

(einfache Wertung)

Abgabe beim Kollegstufenbetreuer am: 02. Februar 2004

.....

Kursleiter

Inhaltsverzeichnis:

| | |
|---|----|
| 1. Einleitung: Der Traum vom Fliegen | 3 |
| 2. Daniel Bernoulli: Biographie | 3 |
| 3. Die Theorie des Bernoulli-Effekts | 4 |
| 1. Die Kontinuitätsgleichung | 5 |
| 2. Die Bernoulligleichung | 5 |
| 3. Verdeutlichende Darstellung mit dem Venturi-Rohr | 8 |
| 4. Beispiele und Anwendungen im Alltag | 8 |
| 1. Auftrieb beim Flugzeug | 9 |
| 2. Kurve beim Eckball/ Magnus-Effekt | 11 |
| 3. Nachteile des Bernoulli-Effekts | 12 |
| 5. Versuche zum Bernoulli-Effekt | 14 |
| 1. Qualitative Versuche mit wenig Aufwand | 14 |
| 1. Sogwirkung zweier Blätter | 14 |
| 2. Tischtennisball im Trichter | 14 |
| 3. Tischtennisball im Luftstrom | 15 |
| 2. Tragfläche im Luftstrom | 16 |
| 3. Hydrodynamisches Paradoxon | 16 |
| 1. Allgemeiner Versuch | 16 |
| 2. Untersuchung der Kraft in Abhängigkeit vom Druck | 18 |
| 4. Versuche mit dem Windkanal | 18 |
| 1. Modellhaus im Windkanal | 19 |
| 2. Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Querschnitt | 20 |
| 6. Schluss: Eigene Erfahrungen mit dem Bernoulli-Effekt | 21 |

1. Einleitung: Der Traum vom Fliegen

Seit jeher hegt die Menschheit den Traum vom Fliegen. Doch es ist uns erst vor gut 100 Jahren gelungen, Flugzeuge zu bauen. Auch ich bin schon seit meiner Kindheit fasziniert vom Fliegen. Und als es an der Zeit war ein Facharbeitsthema zu wählen entschied ich mich für eben diese alte Faszination: „Warum fliegt ein Flugzeug?“. Ich beschloss jedoch das Thema etwas zu verallgemeinern und wählte daher den Bernoulli-Effekt. Dadurch gehe ich das Problem der Fliegerei von der physikalischen Seite an. Im folgenden werde ich nun Daniel Bernoulli vorstellen, das Bernoulli-Prinzip physikalisch erläutern und herleiten. Außerdem werde ich Beispiele und Anwendungen aus dem Alltag nennen und abschließend einige Versuche durchführen und dokumentieren.

2. Daniel Bernoulli: Biographie

Daniel Bernoulli wurde am 8. Februar 1700 in Groningen, einem Ort in den Niederlanden, in eine berühmte Mathematikerfamilie geboren. Diese Familie war von Rivalität, Eifersucht und Bitterkeit geprägt. Sein Vater, Johann, der zusammen mit seinem Bruder Jakob schon Beiträge zur Infinitesimalrechnung gebracht hat, unterhielt in Daniels Geburtsort einen Lehrstuhl für Mathematik. Als Daniel fünf Jahre alt war, zog die Familie in ihre Heimatstadt Basel, wo der Vater den Lehrstuhl für Mathematik des verstorbenen Bruders übernahm. Im Alter von 13 Jahren begann Daniel ein Studium für Philosophie und Logik an der Universität Basel, und machte 1716 seinen Magister. Der Vater erlaubte ihm nicht ein Mathematikstudium zu beginnen und schickte Daniel zurück nach Basel, um Medizin zu studieren, wo dieser 1721 einen medizinischen Titel erwarb. Nebenbei verschuf Daniel sich mathematische und physikalische Kenntnisse. 1725 erhielt er eine Professur für Mathematik an der Akademie der Wissenschaften in St. Petersburg. Dort schuf er auch sein wichtigstes Werk, die „Hydrodynamica“, die sich mit der Strömung von Flüssigkeiten beschäftigt, aber erst 1738 veröffentlicht wurde. Darin befanden sich auch Überlegungen zur kinetischen Gastheorie, die aber damals keine große Beachtung auf sich zog.

Daniel verließ St. Petersburg 1733 und erhielt 1734 zusammen mit seinem Vater eine Auszeichnung der Pariser Universität, die ihnen für ihre Ideen in der Astronomie verliehen wurde. Dieses Ereignis hatte zur Folge, dass ihn sein Vater verstoß, da er es nicht ertragen konnte, mit seinem Sohn auf eine Ebene gestellt zu sein. Daniel lehrte später experimentelle Physik, Anatomie und Botanik an den Universitäten von Groningen und Basel. Außerdem beschäftigte er sich mit der Gravitation, den Meeresgezeiten, dem Magnetismus, den Ozeanströmungen und dem Verhalten von Schiffen auf See. Daniel Bernoulli erhielt zu seinen Lebzeiten viele Auszeichnungen und Preise. Er starb schließlich am 17. März 1782 in Basel.



D. Bernoulli

(Bild aus Quelle 1)

3. Die Theorie des Bernoulli-Effekts

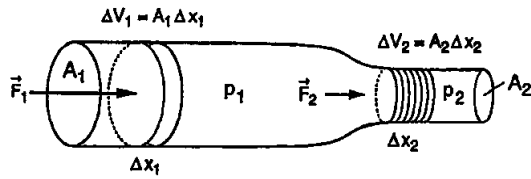
Der Bernoulli-Effekt besagt:

Je enger ein Querschnitt, durch den ein Fluid (Flüssigkeit oder Gas) fließt, desto schneller ist es und desto geringer ist sein Druck

Dies beruht auf dem Energieerhaltungssatz.

Zunächst muss man die Annahme treffen, dass es sich um ein ideales und inkompressibles Fluid handelt.

Dieses reibungsfreie Fluid fließt nun durch ein waagrechtes, sich verjüngendes (von einem größeren in einen kleineren Querschnitt übergehendes) Rohr.



(Zeichnung aus Quelle 13)

3.1. Die Kontinuitätsgleichung

Da man davon ausgeht, dass das Fluid inkompressibel ist, muss es in gleichen Zeiten gleiche Volumina durchlaufen, also gilt:

$$\frac{V_1}{\Delta t} = \frac{V_2}{\Delta t}$$

$$A_1 \frac{\Delta x_1}{\Delta t} = A_2 \frac{\Delta x_2}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \boxed{A_1 v_1 = A_2 v_2}$$

Diese sogenannte **Kontinuitätsgleichung** besagt, dass das Produkt aus Querschnitt und Geschwindigkeit konstant ist.

Das bedeutet, dass bei größeren Querschnitten die Geschwindigkeit des Fluids kleiner wird und umgekehrt.

3.2. Die Bernoulli-Gleichung

Energie ist mit Kraft mal Weg definiert:

$$\Delta W_1 = F_1 \cdot \Delta x_1$$

Aus $p = \frac{F}{A}$ folgt:

$$\Delta W_1 = p_1 A_1 \Delta x_1 = p_1 \Delta V_1$$

ebenso gilt:

$$\Delta W_2 = F_2 \Delta x_2 = p_2 A_2 \Delta x_2 = p_2 \Delta V_2$$

Die eben berechneten Energien sind die **Druckenergien** bzw. die **potentiellen Energien**.

Nun untersuchen wir die kinetische Energie des Fluids:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$$

wegen $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$ gilt:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \rho v^2 \Delta V$$

Wegen der Energieerhaltung gilt:

$$E_{pot1} + E_{kin1} = E_{pot2} + E_{kin2}$$

$$p_1 \Delta V_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \Delta V_1 = p_2 \Delta V_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \Delta V_2$$

Da sich bei inkompressiblen Fluiden das Volumen nicht ändert ($\rho = \text{const.}$), gilt:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$$

Wenn man dies in die obige Gleichung einsetzt und ΔV kürzt, erhält man:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Daher gilt für den Gesamtdruck p_0 :

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_0 = \text{const.}$$

p nennt man **statischer Druck**, der aufgrund der Teilchenbewegung zustande kommt.

$\frac{1}{2} \rho v^2$ nennt man **dynamischer Druck** oder **Staudruck**. Er wird auch oft abgekürzt als p_d , und wirkt nur in Strömungsrichtung.

In Worten lautet die Gleichung:

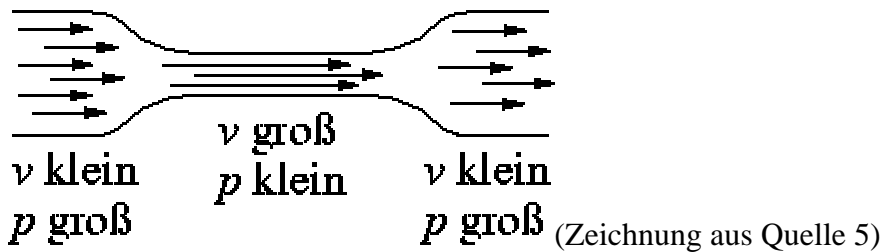
Druckenergie + kinetische Energie = Gesamtenergie

oder:

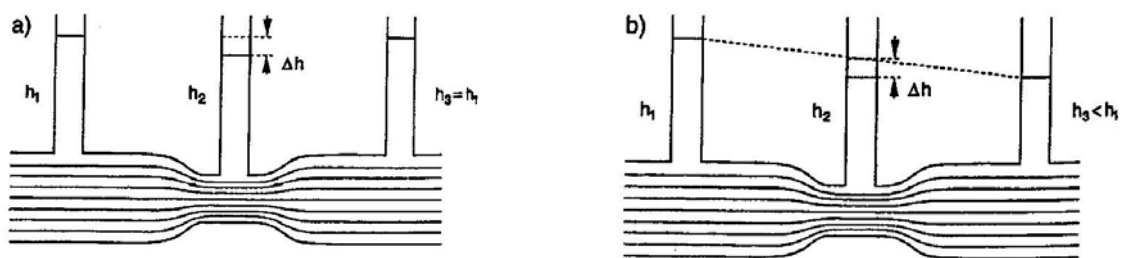
statischer Druck + dynamischer Druck = Gesamtdruck

3.3. Verdeutliche Darstellung am Venturirohr

Folgendes macht den Bernoulli-Effekt noch einmal an einer Zeichnung deutlich.



Die Druckverhältnisse in einem solchen Rohr kann man mittels senkrechter Glasstäbe sichtbar machen:



(Zeichnungen aus Quelle 13)

Die Höhe der Wassersäule zeigt den Druck an, die gestrichelte Linie in Bild b) zeigt den Reibungsverlust des in Wirklichkeit nicht idealen Fluids.

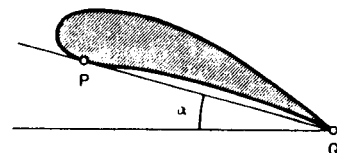
4. Beispiele und Anwendungen aus dem Alltag

Im folgenden werden nun einige Abbildungen mit Linien um einen Körper zu sehen sein. Diese Linien nennt man Strömungsfäden und sollen die Druckverhältnisse visualisieren. Je enger sie zusammen sind, desto schneller ist das Fluid und desto niedriger ist der dort vorherrschende Druck.

4.1. Auftrieb beim Flugzeug

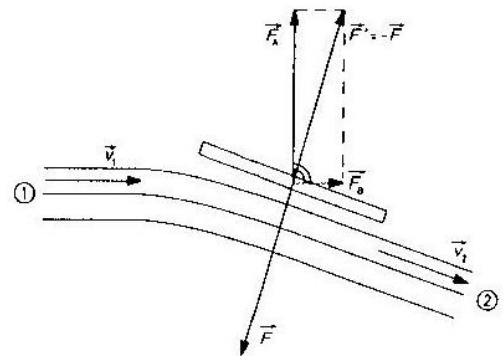
Am 17. 12. 1903 starteten die Gebrüder Wright erstmals ein motorisiertes Flugzeug, das schwerer als Luft war. In den zwölf Sekunden, in denen es flog, legte es 37 Meter zurück. Dies ermöglichte ihnen unter anderem der Bernoulli-Effekt. Der Prozess des Auftriebs ist aber in Wirklichkeit sehr viel komplizierter, da hier neben dem Bernoulli-Effekt auch Anstellwinkel, Dichteänderung der Luft und Wirbelbildung eine große Rolle spielen. Die weit verbreitete Meinung über den dynamischen Auftrieb eines Flugzeugs ist, dass die Luftteilchen oberhalb der Tragfläche nur wegen der typischen Wölbung eine schnellere Geschwindigkeit haben als die Teilchen unterhalb. Dies ist aber falsch. Versuche zeigen, dass teilweise die Teilchen oberhalb eher am Tragflächenende ankommen, als die unterhalb.

Zunächst betrachten wir in knapper Ausführung, welche Rolle der Anstellwinkel α spielt:



(Zeichnung aus Quelle 14)

Zur Vereinfachung nehmen wir anstelle des Tragflächenprofils eine ebene Platte. Außerdem nehmen wir an, dass der Querschnitt, der Massendurchsatz (Masse/Zeit) und die Geschwindigkeitsbeträge an der Stelle 1 gleich denen an denen Stelle 2 sind. Die Richtungsänderung der Luftgeschwindigkeit bedeutet eine Impulsänderung.

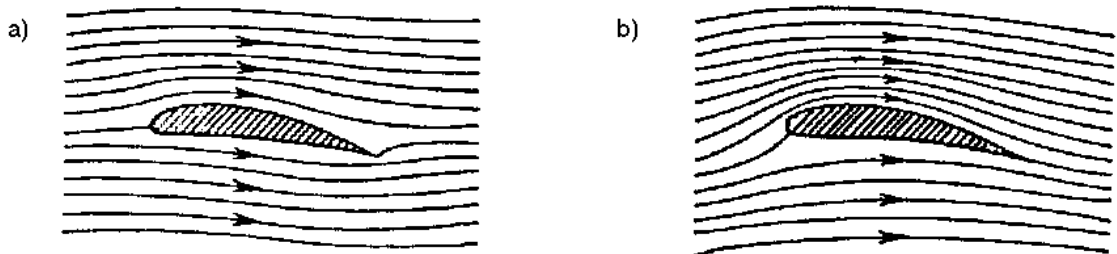


(Zeichnung aus Quelle 14)

Der verlorene Impuls wird dabei auf die Tragfläche übertragen, so dass diese einen Impuls und dadurch eine Kraft F' erfährt, die man in den Luftwiderstand F_B und die **Auftriebskraft F_A** zerlegen kann. Bei einer Tragfläche ist dieser Effekt bedingt durch die Form der Flügelnase schon ohne Anstellwinkel ($\alpha=0$) zu beobachten.

Doch was hat das mit dem Bernoulli-Effekt zu tun?

Das Geheimnis wurde von Prandtl gelüftet. Wenn man die Strömungsgeschwindigkeit steigert, wie das in etwa beim Start eines Flugzeugs geschieht, entsteht ab einer bestimmten Geschwindigkeit ein sogenannter Anfahrwirbel. Gleichzeitig ändert sich auch das Strömungsbild von a) in b) um die Tragfläche und somit die Druckverhältnisse.



(Zeichnungen aus Quelle 14)

Die Erklärung dafür steckt hinter dem Anfahrwirbel. Wirbel treten nur paarweise auf, damit die Summe der Drehimpulse gleich 0 ist (Drehimpulserhaltung).

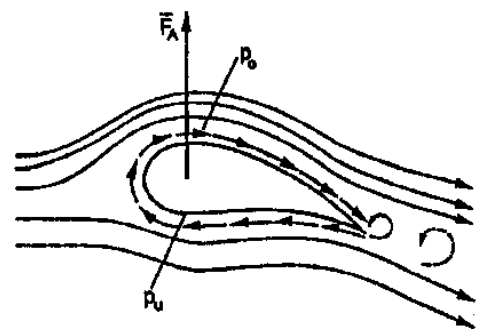
Damit der Anfahrwirbel ausgeglichen wird, bildet sich ein **gebundener Wirbel** zu einer **Zirkulation** aus, welche dem Anfahrwirbel entgegenwirkt. Diese Umströmung

des Tragflügels addiert sich auf der Oberseite und subtrahiert sich auf der Unterseite, so dass oben eine schnellere Teilchenbewegung als unten vorherrscht. Somit entsteht ein Druckunterschied mit Unterdruck oberhalb und Überdruck

unterhalb der Tragfläche, was diese nach oben saugt. Diese Zirkulation

bleibt erhalten, bis der Luftstrom gegen die Tragfläche abreißt.

Fazit: Der Auftrieb beim Flugzeug kommt einerseits durch den Anstellwinkel zustande, andererseits durch den Bernoulli-Effekt, der durch günstige Wirbelbildung eintritt.



(Zeichnung aus Quelle 16)

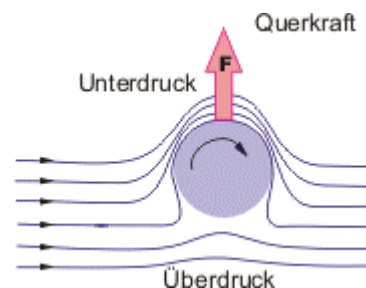
4.2. Kurve beim Eckball/ Magnus Effekt

Wenn beim Fußball ein Eckball gestoßen wird, dann schneidet der ausführende Spieler den Ball oft so an, dass er je nach Spielsituation auf einer gekrümmten Bahn in Richtung des gegnerischen Strafraums oder davon weg bewegt. Auch dies beruht auf dem Bernoulli-Effekt, hier im Zusammenhang mit dem **Magnus-Effekt**. Beim Fußball werden Bälle zwischen zehn und 100 Metern mit ca. 36 – 110 km/h geschossen. Durch die hohe Geschwindigkeit, die die Luft an den Seiten des Balls hat, entsteht ein Unterdruck (Siehe Bild a)). Will nun der Spieler den Ball nicht auf einer Linie schießen, sondern ihn dazu bringen eine „Kurve“ zu fliegen, muss er den Ball in Drehung versetzen. Dies macht er, indem er den Ball nicht genau mittig trifft, sondern etwas seitlich und ihn dadurch in Rotation versetzt. Der Ball muss sich in die Richtung drehen, in die er fliegen soll. Durch die Reibung zwischen dem Ball und der Luft reißt der rotierende Ball die entgegenkommende Luft mit sich auf eine Seite. Nun addieren sich die Geschwindigkeit des Luftstroms (eigentlich die Geschwindigkeit des Balles) und die der durch die Drehung mitgerissenen Luft, die Luft wird schneller und es entsteht ein Unterdruck. Auf der anderen Seite wird die Luft durch die Reibung gebremst, sie wird langsamer und es entsteht ein Überdruck (Siehe Bild b)). Daraus resultiert eine Querkraft in Richtung des Unterdrucks. Die Folge ist, dass der Ball eine Kurve fliegt. Genauso funktioniert im Tennis der sogenannte „Spin“ oder „Top-Spin“.

a)



b)



(Zeichnungen aus Quelle 7)

das Dach streicht, hat eine sehr hohe Geschwindigkeit. An der windzugewandten Seite ist jedoch der Impuls der Windteilchen, der die Dachziegel an den Dachstuhl drückt stärker, als die Sogwirkung der schnellen Luft. An der windabgewandten Seite jedoch fehlt dieser Impuls und die Dachziegel werden regelrecht vom Dachstuhl gesaugt.

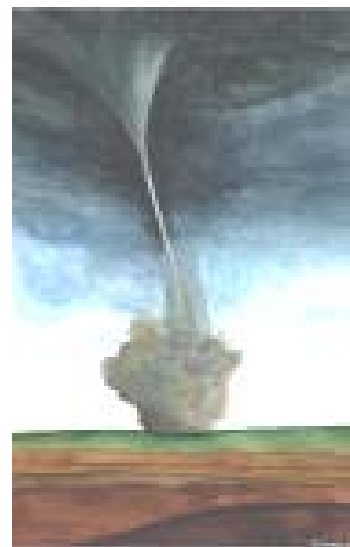
Auch Wirbelstürme, wie z.B. Tornados wären bei weitem nicht so zerstörerisch, wenn es den Bernoulli-Effekt nicht gäbe. Da sich die Luftmassen der Windhose mit einer enormen Geschwindigkeit bewegen und so der Druck im Wirbel selbst sehr gering ist, saugt der Wirbelsturm alles was in seine Nähe kommt mit ungeheurer Kraft in sich hinein.

Im Verkehr kann es ebenfalls zu gefährlichen Situationen verursacht durch den Bernoulli-Effekt kommen. Große, sich schnell bewegende Fahrzeuge reißen bedingt durch die Reibung Luft mit sich, die durch ihre Bewegung einen niedrigeren Druck hat als die in ihrer Umgebung. So saugt es z.B. leere Mülltonnen in die Straße, wenn ein LKW daran vorbeifährt. Auch können sich zwei entgegenkommende Züge oder Schiffe einander ansaugen, wenn sie zu wenig Abstand haben.

Ein Rennauto hat annähernd das Profil einer Flugzeugtragfläche. Dadurch ist es ständig einer nach oben ziehenden Kraft ausgesetzt, die aber durch Spoiler und andere Hilfsmittel unterbunden wird. Ist die Bodenhaftung aus irgendeinem Grund gestört, kann da Auto regelrecht abheben, wie z.B. dieser Mercedes in Le Mans.



(Bild aus Quelle 8)



(Bild aus Quelle 9)

5. Versuche zum Bernoulli-Effekt

5.1. Qualitative Versuche mit geringem Aufwand

5.1.1. Sogwirkung zweier Blätter

Hält man zwei Din A4 Blätter Hochformat im Abstand von ca. 10 cm und bläst einmal kräftig von oben zwischen den Blättern durch, dann saugen sie sich gegenseitig an. Grund hierfür ist ein Unterdruck zwischen den Blättern, der durch die bewegte Luft entsteht.



5.1.2. Tischtennisball im Trichter

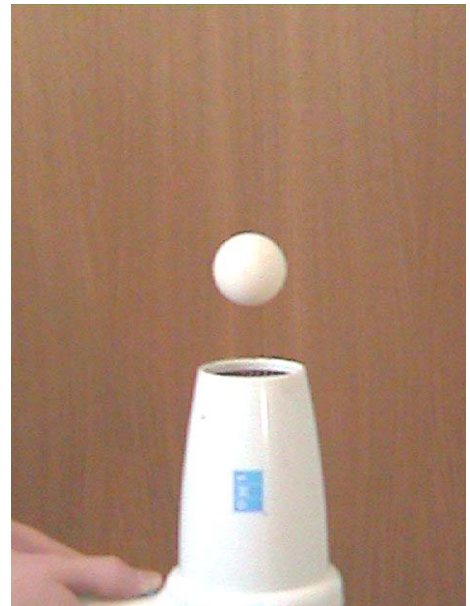
Man hält einen Trichter mit der großen Öffnung nach unten und bläst von oben mit einer Druckluftpistole in den Hals des Trichters. Dann hält man einen Tischtennisball unter den Trichter und nähert ihn langsam an den Trichter an. Wenn der Luftzug durch den Trichter stark genug ist, saugt es den Ball schon von alleine in den Trichter. Der Ball scheint im Trichter zu kleben.



Der Grund hierfür ist, dass die Luft oberhalb des Balles aufgrund der Kontinuitätsgleichung eine sehr viel größere Geschwindigkeit hat, als die Luft unterhalb des Balles, somit weniger Druck hat und den Ball ansaugt.

5.1.3. Tischtennisball im Luftstrom

Ein Tischtennisball wird in einen senkrechten Luftstrahl, der von einem normalen Haarfön erzeugt wird, platziert. Dieser schwebt anschließend in ein paar cm über der Düse des Föns. Man kann den Fön sogar bis zu ca. 30° gegen die Vertikale schwenken. Dreht man den Fön über diesen Winkel hinaus, fällt der Tischtennisball aus dem Strahl heraus. Der Ball schwebt, weil einige Luftteilchen des Strahls ihren Impuls auf den Ball übertragen und so die Gewichtskraft des Balles ausgleichen. Er ist so in einem stabilen Gleichgewichtszustand. An den Seiten des Balles, entsteht ein Unterdruck, da die schnellen Teilchen des Stroms „die angrenzenden (in Ruhe befindlichen) mitreißen, so dass dort



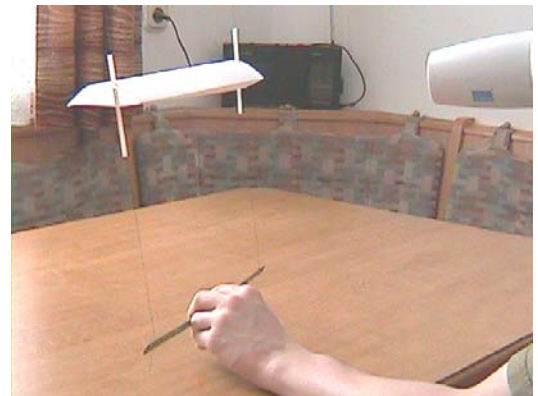
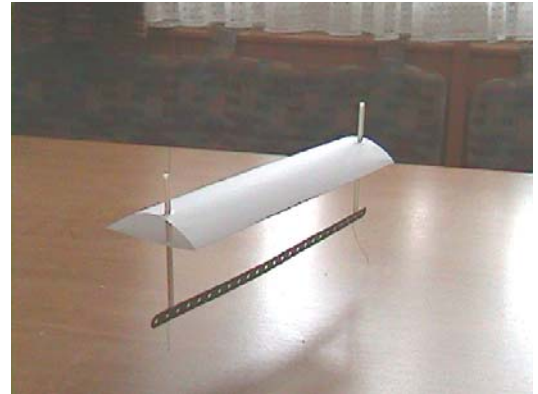
weniger Teilchen (also ein Unterdruck) vorhanden sind.“ (Zitat aus Quelle 10). Schwebt der Ball nun aus irgendeinem Grund auf eine Seite aus dem Zentrum heraus, wird er automatisch wieder in seine alte Position zurückgedrängt, weil der Luftstrom auf der gegenüberliegenden Seite durch den Ball nicht mehr so stark gehindert wird und dadurch schneller ist. Es entsteht ein Unterdruck, der den Ball wieder zurück in die Mitte saugt. Genau deshalb kann man den Fön auch so stark neigen. Wird der Ball durch die Schwerkraft auf eine Seite gezogen, gleicht dies der Luftstrahl wieder aus und hält den Ball in seiner Position.

(Versuch auf Video-CD)

5.2. Tragfläche im Luftstrom

Der Versuchsaufbau ist folgendermaßen: Zwei parallele Fäden sind vertikal gespannt. Auf diesen Fäden ist ein nach oben und unten bewegliche, aus Papier gefertigter Tragflügel angebracht, der mittels zwei Strohhalmen im Papier leichtgängig rutschen kann. Nun bläst man die Tragfläche mit einem Föhn so an, dass die Luft genau horizontal gegen den Tragflügel bläst. Damit wird verhindert, dass die Tragfläche durch den Luftzug von unten angehoben wird. Durch den Bernoulli-Effekt wird der Tragflügel angehoben und läuft auf den Fäden auf und ab.

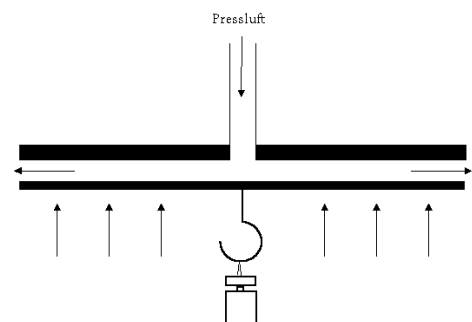
(Versuch auf Video-CD)



5.3. Hydrodynamisches Paradoxon

5.3.1. Allgemeiner Versuch

In einer 17 x 17 cm großen Platte ist in der Mitte ein Loch gebohrt, in dem ein Anschluss für Druckluft eingeschraubt ist. Darunter ist eine Platte mit den gleichen



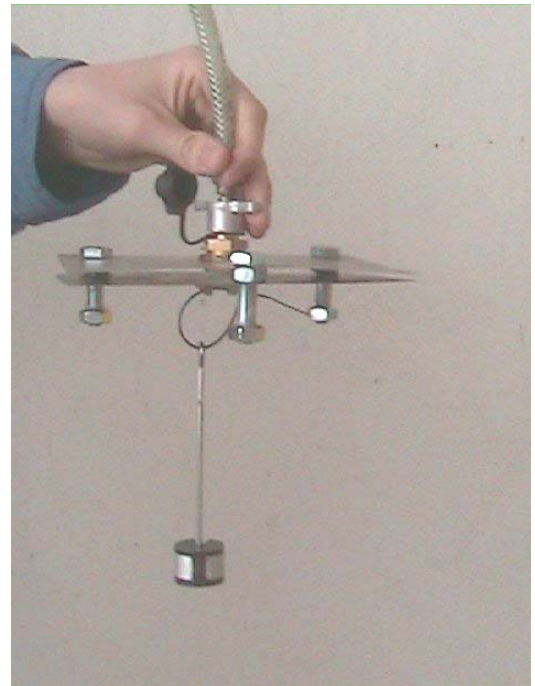
(Zeichnung nach Quelle 11)

Abmessungen angebracht, die unten mit einer Schlaufe versehen ist. Um ein Verrutschen der unteren Platte zu vermeiden, sind drei Schrauben mit der oberen Platte verschraubt. Die Muttern dienen zugleich als Abstandhalter, damit die Platten nicht ganz zusammenstoßen können und so der Luftstrom abreißt. Dass sich die untere, sehr dünne Platte nicht im Gewinde der Schrauben verhakt, ist Tesafilm um die Schrauben gewickelt, auf dem sich die Platte sehr leicht hin- und herbewegen lässt.

Im Laufe meiner Versuche habe ich festgestellt, dass es günstiger wäre, die obere Platte aus einem dickeren Material zu fertigen und statt der Schrauben Bolzen mit glatter Oberfläche zu verwenden.

Man beobachtet, dass die untere Platte nach dem Aufdrehen der Druckluft wider Erwarten nicht nach unten gedrückt wird, sondern nach oben von der anderen Platte angesaugt wird. Die Gewichtskraft und der sich auf die untere Platte von den Luftteilchen übertragene Impuls werden durch den Druckunterschied um die untere Platte überwunden. Die Geschwindigkeit der nach allen Seiten entweichende Luft ist so groß, dass der Druck zwischen den Platten sehr viel kleiner ist als außen an den Platten. Als logische Konsequenz saugen sie sich an.

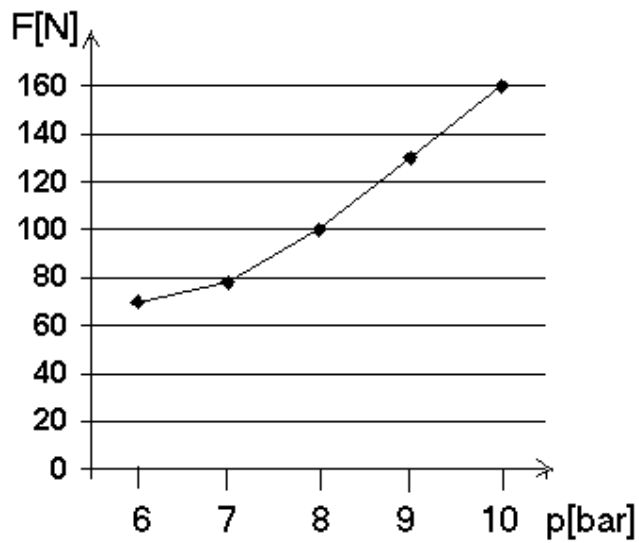
(Versuch auf Video-CD)



5.3.2. Untersuchung der Kraft in Abhängigkeit vom Druck

In diesem Versuch wird die Anziehungskraft der Platten in Abhängigkeit vom Druck der Druckluft untersucht:

| | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|
| Druck[bar] | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Kraft[N] | 0,70 | 0,78 | 1,00 | 1,30 | 1,60 |



Man erkennt eine Parabel, was bedeutet, dass die Kraft direkt proportional zum Quadrat des Drucks ist, oder: $F = Cp^2$

5.4. Versuche mit dem Windkanal

Folgende Versuche habe ich mit diesem Windkanal gemacht:



Ich habe ihn nicht selber gebaut, sondern von einem Bekannten bekommen. Der Kanal ist 60 cm lang, 12cm hoch und 11 cm breit. Er wird von einem 220-Volt-Motor mit 6 Ampere angetrieben, dessen Geschwindigkeit man stufenlos regeln kann. An diesem Motor ist ein Gebläserad so angebracht, dass es die Luft durch den Kanal saugt. Zwischen Kanal und Ventilator ist ein Gitter angebracht, das Verwirbelungen vermeiden soll. Man kann die Windgeschwindigkeit von 0 - 10 m/s stufenlos regeln. Am Windkanal ist auf der Oberseite eine Mechanik angebracht, mit welcher man den Luftwiderstand verschiedener Körper messen kann.

5.4.1. Modellhaus im Windkanal

Im folgendem Versuch soll nun simuliert werden, wie ein Hausdach vom Wind abgedeckt wird. Man stellt ein aus Pappe gefertigtes Modellhaus so in den Windkanal, dass der First quer zur Windrichtung steht. Dieses Haus ist innen beschwert, dass es nicht vom Sog mitgerissen wird. Auf dem Haus ist ein Dach aus Papier, das auf der windzugewandten Seite mit einem Tesafilm am Haus angeklebt ist, so dass der Wind nicht von vorne unter das Dach blasen kann. Schaltet man nun den Windkanal ein und erhöht die Windgeschwindigkeit langsam, hebt sich das Dach an der windabgewandten Seite langsam vom Haus, bis es ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit parallel zum Luftstrom steht (siehe. Photo).



(Versuch auf Video-CD)

5.4.2. Bestätigung der Kontinuitätsgleichung

Mit diesem Versuch soll nun die Kontinuitätsgleichung untersucht werden: Der Regler des Ventilators wird auf einen festen Wert eingestellt. Mit dem Luftwiderstand einer Platte mit einem Radius von 19 mm und einem bekannten c_w -Wert kann man die Geschwindigkeit des Luftstroms im Windkanal ermitteln. Dabei werden die Werte der Luftwiderstandskraft bei verengtem und normalem Querschnitt des Kanals mit einer Federwaage gemessen. Die Verengung wird mit eigens für diesen Versuch gefertigten Brettern gemacht, die um Verwirbelungen zu vermeiden, vorne und hinten keilförmig zugeschnitten sind.

Der Luftwiderstand wird bei folgenden Querschnitten gemessen:

$$A_0 = 0,0132 \text{ m}^2$$

$$A_1 = 0,01045 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,00779 \text{ m}^2$$

Die zugehörigen Geschwindigkeiten werden über folgende Formel berechnet:

$$F_w = c_w A \frac{\rho v^2}{2} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2}{A \rho c_w} F} = 35 \sqrt{\frac{m}{kg}} \sqrt{F}$$

$$F_0 = 50 \text{ mN} \quad v_0 = 7,83 \text{ m/s}$$

$$F_1 = 65 \text{ mN} \quad v_1 = 8,92 \text{ m/s}$$

$$F_2 = 105 \text{ mN} \quad v_2 = 11,34 \text{ m/s}$$

Nun werden die Produkte aus Fläche und Geschwindigkeit verglichen:

$$A_0 v_0 = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_1 v_1 = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_2 v_2 = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

Die geringe Abweichung kann auf Messfehler zurückgeführt werden.

Man sieht also, dass das Produkt aus A und v tatsächlich konstant ist.

6. Schluss: Eigene Erfahrungen mit dem Bernoulli-Effekt

Meiner Meinung nach kann man die vielen in Natur und Technik vorkommenden Phänomene, die auf dem Bernoulli-Effekt basieren, erst erkennen, wenn man sich ausführlich damit beschäftigt hat. Mir persönlich hat diese Beschäftigung mit dem Thema sehr viel Spaß bereitet. Fasziniert hat mich, dass dieser Effekt so viele Anwendungsmöglichkeiten hat, von denen ich nur ein paar ausgeführt habe. Besonders interessant war es für mich, dieses Phänomen durch eigene Versuche zu untersuchen. Zur besseren Veranschaulichung habe ich eine Video-CD mit einigen Versuchen erstellt.

Quellenverzeichnis:

- 1) S. Kressierer & M. Paizoni: „**Daniel Bernoulli**“, Internetseite
<http://www1.physik.tu-muenchen.de/~kressier/Bios/Bernoulli.html>
 Erstellungsdatum: Jahr 2000, aufgerufen am 05.12.2003
- 2) Verfasser unbekannt: „**Bernoulli, Daniel – Physik-Lexikon** - “
 Internetseite
<http://www.physik-lexikon.de/viewlexikon2.php?suchwort=Bernoulli,%20Daniel>
 ohne Erstellungsdatum, aufgerufen am 05.12.2003
- 3) J.J. O'Connor & E.F. Robertson: „**Bernoulli_Daniel**“, Internetseite
<http://www.mathsoc.spb.ru/pantheon/bernoull/dan.html>
 ohne Erstellungsdatum, aufgerufen am 31.12..2003
- 4) Jan Lyczywek: „**Der Satz des Bernoulli**“, Internetseite
<http://www.philippi-trust.de/hendrik/braunschweig/wirbeldoku/bernoulli.html>
 ohne Erstellungsdatum, aufgerufen am 16.12.2003
- 5) Verfasser unbekannt: „**Energiesatz – Bernoulli-Gleichung**“,
 Internetseite
<http://iva.uni-ulm.de/PHYSIK/VORLESUNG/fluidemedien/node27.html>
 Erstellungsdatum: 28.08.1996, aufgerufen am 27.10.2003
- 6) U. Grünwald: „**Wie fliegen Flugzeuge?**“, Internetseite
<http://www.quarks.de/fliegen2/02.htm - NO-474>
 Erstellungsdatum: 08.06.1999, aufgerufen am 05.12.2003
- 7) Verfasser unbekannt: „**fh-welcome Fußball Warum fliegt der Eckball
 `ne Kurve**“, Internetseite
http://www.fh-welcome.de/bpt/2003/260803_bpt_fussball.html
 ohne Erstellungsdatum, aufgerufen am 16.12.2003
- 8) Verfasser unbekannt: „**PÁG1**“
<http://www.lemans24horas.hpg.ig.com.br/5.htm>
 ohne Erstellungsdatum, aufgerufen am 23.01.2004
- 9) Damon J Crook: „**Damon J Crook Watercolours**“, Internetseite
<http://comp.uark.edu/~dcrook/watercoloursnew.htm>
 Erstellungsdatum: Jahr 2000, aufgerufen am 23.01.2004

- 10) S. Kressierer & M. Paizoni: „**Tischtennisball im Luftstrom**“,
Internetseite
<http://www1.physik.tu-muenchen.de/~kressier/Versuche/ver1500.html>
Erstellungsdatum: Jahr 2000, aufgerufen am 31.12.2003
- 11) S. Kressierer & M. Paizoni: „**Hydrodynamisches Paradoxon**“,
Internetseite
<http://www1.physik.tu-muenchen.de/~kressier/Versuche/ver1515.html>
Erstellungsdatum: Jahr 2000, aufgerufen am 31.12.2003
- 12) Verfasser unbekannt: „**Flüssigkeitsmechanik**“, Internetseite/pdf-
Dokument
http://e1.physik.uni-dortmund.de/physik_a1/A1_16_4in1.pdf
ohne Erstellungsdatum, aufgerufen am 11.01.2004
- 13) W. Demtröder: „**Experimentalphysik 1, Mechanik und Wärme**“
Berlin, Springer Verlag; 2003³
- 14) Hammer, Knauth, Kühnel: „**Physik Mechanik Additum
Strömungslehre**“
München, Oldenbourg Verlag, 1987
- 15) Th. Ditzinger: „**Spaß und Spannung mit Physik**“
München, Südwest-Verlag, 1999
- 16) H.J. Paus: „**Physik in Experimenten und Beispielen**“
München, Carl Hanser Verlag, 2002²

Die nicht zitierten Bilder sind von mir selbst gemacht.

Anlage:

Video-CD mit Versuchen

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

.....,
Ort Datum Richard Wittmann