

### 3.2 Themenblock „Ideale und reale Flüssigkeiten und Strömungen“

	Schritte	Materialien
1.	<p><b>Ideale Flüssigkeiten und Strömungen.</b>  <b>Beispiel: Das hydrodynamische Paradoxon.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorversuche</li> <li>• Modellbildung: Kontinuum und ideale Strömungen</li> <li>• Die Kontinuitätsgleichung</li> <li>• Druckänderungen längs der Stromlinie. Zwei alternative Herleitungen des Bernoullischen Gesetzes</li> <li>• Druckänderung senkrecht zur Stromlinie</li> <li>• „Fast unzählige“ Anwendungen</li> </ul>	<p><i>Vorversuche:</i> Papierstreifen, Pappe, Strohhalme</p> <p><i>Versuch Zerstäuber:</i> Strohhalme</p> <p><i>Versuche „... im Spiel“:</i> Löffel, Münze, Glas, Trichter, Tischtennisball</p> <p><i>Versuch „Schiffe“:</i> Spielzeugschiffe, Schüssel, Wasseranschluss mit Schlauch, Faden</p> <p><i>Demonstration „Heul-Rohr“:</i> Heulrohr im Spielwarenhandel erhältlich</p>
2.	<p><b>Reale Flüssigkeiten und Strömungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Viskosität Abhängigkeit von der Temperatur Messung der Viskosität</li> <li>• Die Haftbedingung</li> <li>• Newtonsche und nichtnewtonsche Fluide</li> </ul>	<p><i>Demonstration „Zähigkeit“:</i> Wasser, Glyzerin, Honig, Motorenöl usw.</p> <p><i>Versuch „Kugelfallviskosimeter“:</i> Standzylinder, 2 mm Stahlkugel, zu untersuchende Flüssigkeiten</p> <p><i>Demonstration „Nichtnewtonsche Fluide“</i> hüpfender Kitt ( z.B. Physikboutique, Stark Verlag, Pf: 1852, 85318 Freising), Slime (Spielwarenläden)</p>

#### 3.2.1 Ideale Flüssigkeiten und Strömungen am Beispiel des hydrodynamischen Paradoxons

##### VORBEMERKUNGEN

Dieser Themenblock beginnt mit zwei sehr einfachen, verblüffenden Freihandversuchen, deren Erklärungen auf einigen einfachen, aber grundlegenden Gesetzen der Hydrodynamik beruhen. Einer der Vorversuche ist das sog. „hydrodynamische Paradoxon“. Paradoxa nehmen im Physikunterricht, wie auch in der Physikgeschichte, eine wichtige Rolle ein: Sie regen die Lernenden an, einer den eigenen Erwartungen widersprechenden Beobachtung auf den Grund zu gehen. Leider existieren in der Physik nur wenige so leicht zugängliche Paradoxa wie das hydrodynamische, mit seiner relativ einfachen Erklärung und vor allem seiner Vielzahl von Anwendungen im täglichen Leben.

Die Gesetzmäßigkeiten dieses Themenblocks basieren ihrerseits auf allgemeinen Überlegungen zur Modellbildung in der Strömungsphysik, der Einführung des Kontinuumbegriffs und des physikalischen Modells einer idealen Strömung.

Nach der Herleitung der Kontinuitätsgleichung werden zwei alternative Herleitungen der Bernoulligleichung vorgestellt. Diese Gleichung erlaubt Aussagen über den Druckverlauf längs einer Stromlinie. Die erste Herleitung über die Energieerhaltung ist in den meisten Lehrbüchern vertreten und wird deshalb zuerst vorgestellt. Sie hat den Vorteil, dass sie auf grundlegenden und in der Schule bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht und mathematisch einfach herzuleiten ist. Ihr Nachteil: Sie verstellt den Blick für den Wirkungsmechanismus, der für die Beschleunigung der Flüssigkeitselemente verantwortlich ist. Dies kann die zweite Herleitung über die Eulerschen Gleichungen leisten, die die Gesetze der Newtonschen Dynamik für Fluide formulieren. Sie besitzt auch den Vorteil, daß sie den Weg für die Untersuchung der Druckänderungen senkrecht zur Stromlinie ebnet, die bei gekrümmten Stromröhren auftreten.

Diese grundlegenden Gesetzmäßigkeiten erlauben die Erklärung vieler Strömungsphänomene aus dem Alltag, die im weiteren Verlauf vorgestellt werden. Dieser Themenblock lebt von den verschiedenen einfachen Versuchen, die mit einem Minimum an Aufwand nachgemacht werden können und den zahlreichen Beispielen aus dem Alltag. Erfahrungsgemäß fallen den Lernenden selbst eigene Beispiele ein.

Weitere Experimente und Beispiele, vor allem in Hinblick auf den aerodynamischen Auftrieb, wurde von WELTNER mehrfach veröffentlicht (z.B. WELTNER 1997, WELTNER 1990).

### **LEHR-UND LERNZIELE**

Die Schülerinnen, Schüler und Studierenden sollen

- die Möglichkeit der Beschreibung von Flüssigkeiten und Gasen im Rahmen einer gemeinsamen Theorie kennen lernen.
- die ideale Strömung als vereinfachtes Modell erkennen und sich anhand dieses Beispiels die Bedeutung des Modellbegriffs in der Physik vergegenwärtigen.
- die Anwendbarkeit der bekannten Energie- und Impulserhaltungssätze aus der Mechanik auf Strömungsphänomene erkennen.
- die resultierenden Gleichungen auf einfache Versuche anwenden können.
- eigene Anwendungsbeispiele aus dem Alltag finden können.

**AUSFÜHRUNG*****Vorversuche:***

1. Ein Streifen Papier wird so vor den Mund gehalten, daß er sich vor dem Mund wölbt und dann lose nach unten hängt. Nun wird kräftig über das Papier geblasen. Überraschenderweise wird der Papierstreifen nach oben gesogen.



Abb. 2.1: Vorversuch (KORNECK et al. 1995)

2. Aus nicht zu dünner Pappe oder Bierdeckeln werden zwei gleiche Kreise mit je ca. 10 cm Durchmesser ausgeschnitten. Eine Scheibe wird in der Mitte mit einem Loch versehen, dessen Durchmesser so groß sein sollte, dass ein dicker Trinkhalm hindurchpasst. Der Halm wird an einem Ende in das Loch eingeklebt. Nun werden die beiden Scheiben übereinander auf die flache Hand gelegt und fest durch den Halm geblasen. Während des Blasens kann jetzt die untere Scheibe losgelassen werden, ohne dass sie fällt. D.h. die untere Scheibe wird nicht, wie vielleicht erwartet, weggeblasen, sondern angesogen. Es muss also neben dem durch das Ausströmen auf die Fläche ausgeübten Druck, dem sog. Staudruck noch eine zweite, entgegengesetzt gerichtete Kraft geben, die hier überwiegt. Diesen Effekt nennt man das „hydrodynamische Paradoxon“. Genaugenommen müsste man hier, da es sich bei dem strömenden Medium um Luft handelt, vom „aerodynamischen Paradoxon“ sprechen. Das Experiment gelingt genauso mit Wasser und danach wurde das Experiment auch benannt. Welche Gesetzmäßigkeit steckt hinter diesen Phänomenen?

**BEGRIFFLICHER UND THEORETISCHER HINTERGRUND****Was ist ein Modell in der Physik?**

Um ein physikalisches Phänomen zu erklären, muss man sich immer zuerst überlegen, welche physikalischen Größen und Stoffeigenschaften für die Erklärung notwendig sind und welche begründet ignoriert werden können. Das heißt, man muss sich ein Modell bilden.

Ohne Modelle wäre die Physik nicht so erfolgreich. Allerdings muss man sich immer im klaren sein, dass ein Modell die Realität nur in beschränktem Maß beschreibt. Deshalb können sich Modelle auch als ungeeignet erweisen und müssen verworfen oder modifiziert werden.

Das bedeutet, dass die Grenzen des gewählten Modells immer im Auge behalten werden müssen.

Für die Erklärung der Vorversuche wird die strömende Luft idealisiert:

Annahmen:

1. Das beobachtete Medium ist ein Kontinuum.
2. Die Strömung ist „ideal“.

### Was ist ein Kontinuum?

Jedes Gas und jede Flüssigkeit besteht aus sehr vielen Teilchen, nämlich aus ca.  $6,022 \cdot 10^{23}$  Teilchen pro Mol. Da wir aber die Flüssigkeit oder das Gas makroskopisch betrachten, d.h. in einem Maßstab, der sehr viel größer ist als die Abmessungen einzelner Moleküle, erscheinen sie zusammenhängend. Deshalb wählt man ein physikalisches Modell, in dem nicht das Verhalten der einzelnen Moleküle eine Rolle spielt, sondern lediglich das statistische Durchschnittsverhalten innerhalb eines gewählten Flüssigkeitselements. In einem solchen Modell ist der Stoff ein „Kontinuum“.

### Ideale Strömungen

Hier handelt es sich, wie der Name schon sagt, um eine Idealisierung, die physikalisch nicht zu realisieren ist. Trotzdem ist das Modell der idealen Fluide für viele Fälle angebracht, wie z.B. bei der Betrachtung der Phänomene, die anfangs vorgestellt wurden.

Eigenschaften idealer Fluide:

- Reibungsfreiheit, d.h. zwischen zwei parallel zueinander bewegten Flüssigkeitsschichten treten keine Kräfte auf. Daher können nach den Helmholtzschen Wirbelsätzen (1. Themenblock) Wirbel weder entstehen noch vernichtet werden.
- Inkompressibilität, d.h. die Dichte ist unabhängig vom Druck.  
Diese Annahme gilt für alle Flüssigkeiten und auch für Gase, solange deren Strömungsgeschwindigkeit  $1/3$  der Schallgeschwindigkeit nicht überschreitet.  
Auch die Temperatur und damit die Dichte kann in der gesamten idealen Strömung als gleichbleibend vorausgesetzt werden.

## DRUCKÄNDERUNGEN UND BESCHLEUNIGUNGEN - DREI ELEMENTARE GLEICHUNGEN DER HYDRODYNAMIK

### 1. Die Kontinuitätsgleichung

Zur Herleitung der Kontinuitätsgleichung betrachtet man eine Flüssigkeit, die durch ein Rohr strömt. Der Rohrquerschnitt verengt sich im Verlauf des Rohres.

Folgende Annahmen sollen für die Flüssigkeit und die Strömung gelten:

- Die Flüssigkeit strömt reibungsfrei und füllt das Rohr ganz aus.
- Die Strömung ändert sich nicht mit der Zeit. D.h. die Strömungsbewegung ist stationär.
- Während des Strömungsprozesses fließt Materie weder zu noch ab.



Abb. 2.2: Zur Kontinuitätsgleichung

Die Flüssigkeit im Rohr legt, je nach Querschnitt, in der Zeit  $t$  verschieden lange Wege zurück:

$$s_1 = v_1 t$$

$$s_2 = v_2 t$$

Das Volumen, das durch die Querschnitte strömt, erhält man mit:  $V = As$

$$V_1 = A_1 s_1$$

$$V_2 = A_2 s_2$$

Wegen der Inkompressibilität muss in einer bestimmten Zeit das gleiche Volumen durch den großen und den kleinen Querschnitt fließen:

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 v_1 t = A_2 v_2 t$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

Dies ist die **Kontinuitätsgleichung**. Sie ist mit  $m = \rho V$  und  $\rho = \text{konstant}$  eine besondere Form des **Prinzips der Massenerhaltung**.

Aus der Kontinuitätsgleichung folgt also: Für diese Geometrie verhalten sich die Strömungsgeschwindigkeiten umgekehrt proportional zu den Querschnittsflächen.

### **Anwendungsbeispiele:**

1. Autoverkehr: Unter der Annahme, dass auch der Autostrom inkompressibel sei, d.h. der Abstand zwischen den Autos immer gleich bleibt, muss bei einer Fahrbahnverengung von zwei auf eine Spur die Fahrgeschwindigkeit verdoppelt werden, damit die gleiche Automenge passieren kann. In der Praxis aber wird die Geschwindigkeit aus vielen guten Gründen verlangsamt.

2. Blutkreislauf: Durch eine Arterie mit 0,6 cm Durchmesser fließt Blut mit der Strömungsgeschwindigkeit von 10 cm /s. Wegen einer Arterienverkalkung ist der Radius der Blutbahn an einer Stelle auf 0,4 cm verringert.

Wie groß ist dann die Strömungsgeschwindigkeit in der Verengung?

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} = 10 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot \frac{\pi(0,3\text{cm})^2}{\pi(0,2\text{cm})^2} = 22,5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

d.h., wenn sich der Durchmesser um 1/3 verringert, würde die Strömungsgeschwindigkeit um mehr als das Doppelte ansteigen, wenn man für den Blutkreislauf eine ideale Strömung annimmt.

## 2. Druckänderungen längs einer Stromlinie - Zwei alternative Herleitungen des Strömungsgesetzes von Bernoulli

### a. Herleitung über den Energiesatz

Nach der Kontinuitätsgleichung ist die Strömungsgeschwindigkeit im engeren Querschnitt  $A_2$  höher als im weiteren Querschnitt  $A_1$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \quad v_2 > v_1, \text{ wenn } A_2 < A_1$$

Die Flüssigkeit wird an der Verengung beschleunigt.

Mit Hilfe des Prinzips der Energieerhaltung ist der Druckunterschied zwischen dem engen und dem weiten Rohrabschnitt berechenbar: Wird das Flüssigkeitsvolumen, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, von  $A_1$  bis  $A_1'$  verschoben, muss Arbeit  $W_1$  gegen den Druck  $p_1$  an der Stelle  $A_1'$  geleistet werden.

$$W_1 = F_1 s_1 = p_1 A_1 s_1 = p_1 V$$

Im engeren Rohrabschnitt ist die Arbeit durch Verschieben dementsprechend  $W_2$ .

$$W_2 = F_2 s_2 = p_2 A_2 s_2 = p_2 V$$

Diese Energieterme werden Druckenergie genannt.

Die Differenz zwischen den Druckenergien  $W_1$  und  $W_2$  an den verschiedenen Stellen der Röhre wird verwendet, um die Flüssigkeit an der Engstelle zu beschleunigen.

$$W = W_1 - W_2 = (p_1 - p_2) V.$$

An dem verschobenen Volumen wird Arbeit verrichtet, die kinetische Energie nimmt zu:

$$W = W_{\text{kin}2} - W_{\text{kin}1} = \frac{1}{2} \rho V (v_2^2 - v_1^2).$$

Unter der Annahme, dass die Strömung keinen Höhenunterschied überwinden muss, bleibt die potentielle Energie der Strömung gleich. Auch die innere Energie bleibt längs der Strömung unverändert, wenn sich die Temperatur der Flüssigkeit nicht ändert, d.h. weder geheizt noch gekühlt wird.

Durch Gleichsetzen der Druck- und der Bewegungsenergie und Kürzen des Volumens  $V$  erhält man das **Strömungsgesetz von Bernoulli** (1738):

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

$$E_{\text{ges1}} = E_{\text{ges2}}$$

Dabei ist  $p$  der „**statische Druck**“, der nach allen Seiten gleichmäßig wirkt und  $\frac{1}{2}\rho v^2$  der „**dynamische Druck**“ oder auch „**Staudruck**“, der nur in Strömungsrichtung wirkt.

Nach dem Gesetz von Bernoulli ist also längs einer Stromlinie die Summe aus dem statischen Druck und dem dynamischen Druck überall gleich:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstant}$$

Je größer die Strömungsgeschwindigkeit, desto kleiner ist der statische Druck an dieser Stelle.

An Engstellen ist somit der statische Druck geringer als an weiten Stellen (HEYWANG et.al. 1978; BOHL 1991, 81).

## b. Herleitung über die Eulerschen Gleichungen

Welche Kräfte bestimmen die Bewegung eines Flüssigkeitselements?

- Äußere Kräfte  $F_a$
- Reibungskräfte  $F_r$
- Druckkräfte  $F_p$
- Trägheitskräfte  $F_t$

Wie bereits erwähnt, untersuchen wir das einfachste physikalische Modell einer Strömung: Eine stationäre Strömung ohne Reibung und äußere Kräfte (z.B. die Schwerkraft). Deshalb beschränkt sich die Kräftebilanz auf die Trägheitskraft und die Druckkraft:

$$F_t = F_p$$

Mit dem Ortsvektor  $r$  des Fluidelements ist dessen Trägheitskraft gleich

$$F_t = dm \frac{dv}{dt} = dm \ddot{r}$$

Die Beschleunigung  $\ddot{r}$  des Fluidteilchens wird nun in eine Komponente längs und eine Komponente quer der Stromlinie zerlegt (Abbildung 2.3).

Zunächst wird nur die Komponente  $\ddot{s}$  der Beschleunigung längs der Stromlinie betrachtet:

Damit das Flüssigkeitsteilchen beschleunigt wird, muss der Druck auf einer Seite höher sein als auf der anderen. Unter der Annahme, dass der Druck in  $s$ -

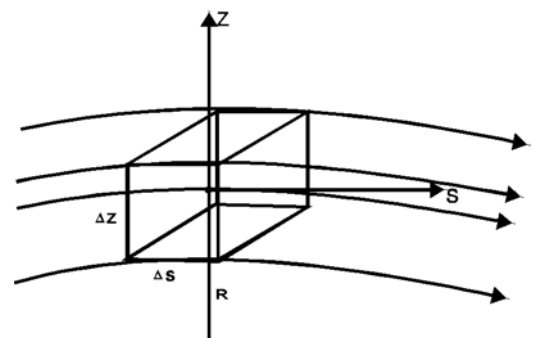


Abb. 2.3: Komponenten der Beschleunigung längs und quer zur Stromlinie

Richtung abnimmt, ergibt sich folgende Bilanz:

$$dm \ddot{s} = -A(p+dp) + Ap$$

Mit  $\ddot{s} = \frac{dv}{dt}$  ergibt sich

$$dm \frac{dv}{dt} = -Adp.$$

Dabei ist dp die Druckänderung in s-Richtung.

Mit  $dm = \rho A ds$  und durch Umformen der Gleichung kann diese integriert werden:

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

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

Es ergibt sich das Strömungsgesetz von Bernoulli:

$$\frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2) = p_1 - p_2$$

Oder in der bekannten Formulierung:

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

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstant}$$

### 3. Druckänderungen senkrecht zur Stromlinie

Wie bereits erwähnt, gilt das Strömungsgesetz von Bernoulli nur für Druckänderungen längs der Stromlinie. Ist aber die Bahn des Flüssigkeitsteilchens - wie in Abbildung 2.3 - gekrümmt, muss auf der Teilchenoberseite ein höherer Druck herrschen als auf seiner Unterseite, damit es der gekrümmten Bahn folgt. Unter den gleichen Voraussetzungen wie in 2.b gilt für die Kräftebilanz in z-Richtung:

$$dm \ddot{z} = A(p+dp) - Ap.$$

Allgemein wird ein Teilchen, das sich auf einer Bahn mit dem Krümmungsradius R bewegt, radial nach innen beschleunigt:

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

Mit  $dm = \rho A dz$

$$dm \frac{v^2}{R} = A(p+dp) - Ap$$

$$\rho A dz \frac{v^2}{R} = Adp$$

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



Aus dieser Gleichung ist erkennbar, dass gekrümmte Stromröhren Druckänderungen senkrecht zu den Stromlinien aufweisen. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit und je kleiner die Krümmung der Stromröhre, desto größer ist die Druckänderung. In einer gekrümmten Stromröhre herrscht außen ein höherer Druck als innen. Bei geraden Stromlinien, d.h. für  $R = \infty$  ist die Druckverteilung über den Querschnitt der Strömung gleich ( $\frac{dp}{dz} = 0$ ) (WELTNER 1997; BOHL 1991, 90). Diese Komponente der Teilchenbeschleunigung tritt nur dann auf, wenn Hindernisse in der Strömung gekrümmte Stromlinien erzwingen. Dadurch entstehen Druckänderungen senkrecht zur Bahn und, je nach Form der Umströmung, Unter- und Überdruckgebiete.

Im folgenden werden, wie beispielsweise im zweiten Vorversuch, Strömungen vorgestellt, die Engstellen passieren müssen. Dabei bleiben die Stromlinien aber im wesentlichen geradlinig. Hier können die Druckdifferenzen in der Strömung durch das Gesetz von Bernoulli erklärt werden. Sobald aber gekrümmte Stromlinien auftreten, muß die Druckänderung senkrecht zu den Stromlinien zur Erklärung herangezogen werden. Der erste Vorversuch ist ein Beispiel für dieses Erklärungsmuster:

### Die Erklärung des ersten Vorversuchs

Jetzt kann man das Anheben des Papierstreifens im ersten Vorversuch erklären: Vor dem Mund wölbt sich das Papier zu einem „Buckel“. Bläst man dieses Hindernis an, folgt die Strömung unter bestimmten Bedingungen der Form des Hindernisses, ohne sich zu verwirbeln. Es entstehen gekrümmte Stromlinien (vergleiche Abbildung 2.3) und damit Druckänderungen senkrecht dazu. In großer Entfernung oberhalb, sowie unterhalb des Papiers herrscht Normaldruck, während aufgrund der umgelenkten Strömung der Druck von außen nach innen abnimmt und deshalb über dem Papier Unterdruck herrscht. Das Papier wird nach oben, zu diesem Gebiet geringeren Drucks hinbewegt. Der Papierstreifen erfährt einen dynamischen Auftrieb.

### Die Erklärung des zweiten Vorversuchs

Wird durch den Trinkhalm geblasen, strömt die Luft durch den Halm, wird durch die untere Scheibe umgelenkt und strömt sternförmig nach außen.

Den Zwischenraum zwischen den Scheiben kann man sich aus Zylindermänteln aufgebaut vorstellen, mit nach außen immer größer werdenden Radien. Sie werden von der Strömung durchflossen. Wegen der Kontinuitätsgleichung muss die Strömungsgeschwindigkeit nach außen hin abnehmen.

Dementsprechend nimmt der Druck zwischen den Scheiben gemäß dem Gesetz von Bernoulli nach außen hin zu. Am äußersten Zylindermantel entspricht er dem Atmosphärendruck.

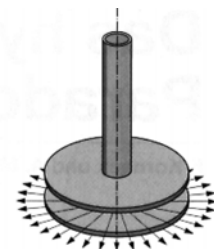


Abb. 2.4: Zwischen parallel zueinander stehenden Scheiben wird Luft geblasen

Das Unterdruckgebiet sorgt dafür, dass die untere Scheibe nicht weggeblasen wird. Der Unterdruck kompensiert nicht nur die Gewichtskraft der Scheibe, sondern auch den im Querschnitt des Halses herrschenden Überdruck, der durch das direkte Anblasen der Scheibe entsteht (NEUNASS 1967, 75).

### FAST UNZÄHLIGE ANWENDUNGEN ...

#### ... in der Technik

Wasserstrahlpumpe: Abbildung 2.5 zeigt das vereinfachte Prinzip einer Wasserstrahlpumpe, die in der Technik häufig eingesetzt wird, z.B. in Vergasern von Ottomotoren. Man benötigt ein Rohr, das sich in seinem mittleren Teilstück verengt. An der verengten Stelle wird ein Steigrohr angebracht, das senkrecht in einem Flüssigkeitsbehälter hängt, aus dem die Flüssigkeit nach oben gepumpt werden soll. Strömt nun Flüssigkeit durch das waagrechte Rohr, muss nach der Kontinuitätsgleichung die Strömungsgeschwindigkeit in der Verengung zunehmen. Dementsprechend sinkt der Druck in der Flüssigkeit von  $p_1$  auf  $p_2$  an der Engstelle.

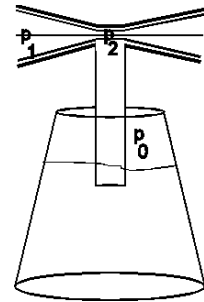


Abb. 2.5: Vereinfachtes Prinzip einer Strahlpumpe

Durch eine geeignete Wahl von Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser kann ein Druck  $p_2$  an der Engstelle erreicht werden, der geringer ist als der Außendruck  $p_0$ . Dieser Unterdruck bewirkt, dass die Flüssigkeit im Steigrohr nach oben gepumpt wird.

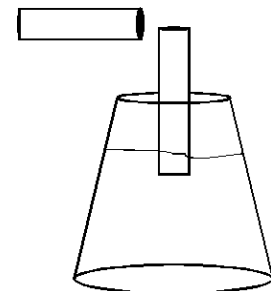


Abb. 2.6: Zerstäuber aus Strohhalmen

Zerstäuber: Der Zerstäuber ist nach einem ähnlichen Prinzip aufgebaut wie die Strahlpumpe, allerdings ragt hier das Steigrohr als Hindernis in eine freie Strömung. Mit einem einfachen Versuch kann man das Prinzip des Zerstäubers demonstrieren (Abbildung 2.6):

#### **Versuch „Zerstäuber“:**

Ein Trinkhalm wird in zwei Teile geschnitten, die senkrecht zueinander gehalten werden. Ein Teil des Halms dient als Steigörhrchen, der zweite Teils als Zerstäuber. Mit ihm wird senkrecht über die Öffnung des im Wasser stehenden Halms geblasen. Das Anblasrohr wird dabei so gehalten, dass sich die obere Kante des Steigrohrs in der Mitte des anströmenden Luftstrahls befindet. Auf diese Weise muss die Strömung um das Steigrohr als Hindernis ausweichen. Es entstehen gekrümmte Stromlinien und dadurch ein Unterdruck über der Steigrohröffnung. Die Flüssigkeit steigt aus dem Behälter nach oben und wird zerstäubt.

Schornstein: Bei Schornsteinen wird der durch gekrümmte Stromlinien entstehende Unterdruck ebenfalls ausgenutzt: Der Kamin ragt als Hindernis in die Luftströmung und zwingt diese auf gekrümmte Bahnen. Dadurch entsteht über seiner Öffnung ein Unterdruckgebiet, das dafür sorgt, dass der Rauch besser abzieht.

Natürlich ist der eben beschriebene Mechanismus nicht allein für das Abziehen des Rauchs zuständig. Vielmehr wird der Haupteffekt beim Schornstein durch den Temperaturunterschied zwischen dem Rauch und der Umgebungsluft erzielt. Auch kann bei den eben beschriebenen Phänomenen nicht davon ausgegangen werden, dass die Strömung tatsächlich reibungsfrei und laminar ist: In einer realen Strömung können Wirbel oder gar Turbulenz entstehen. In erster Näherung ist diese einfache Erklärung gültig.

### ... in der Biologie

**Turmspinnen:** Einige Tierarten nutzen durch Strömungen veränderte Druckverhältnisse aus. Ein Beispiel ist die mit der Tarantel verwandte Turmspinne. Sie lebt in Gebieten mit wüstenähnlichem Klima in röhrenförmigen Höhlen. Diese Höhlen sind etwa 30 cm tief, vertikal in Sand oder lockerem



Erreich gegraben. Den Ausgang

der Röhre bildet ein Krater, der etwa einen Zentimeter hoch über dem Erdboden aufragt. Dieser „Turm“ besteht aus Sand, Erde, Pflanzenresten und Spinnfäden. Die linke Zeichnung in Abbildung 2.7 zeigt einen solchen Turm. Streicht Wind an dem Kraterausgang vorbei, wird die Strömung auf gekrümmte Bahnen gezwungen und es entsteht am Kraterausgang ein Unterdruck. Aus der Röhre wird Luft herausgesogen. Zum Ausgleich tritt nun Luft durch die poröse Erde in die Höhle. Dieses Prinzip hat neben der Sauerstoffversorgung einen weiteren wichtigen Vorteil: Da die Spinne in sehr heißen Gebieten lebt, würde ihre Höhle den Tag über austrocknen. Dies wird durch den ständigen Zufuhr an, durch den Erdboden gekühlter, feuchter Luft verhindert.

**Prähirhund:** Eine andere Tierart, die Druckunterschiede ausnutzt, ist der Prähirhund, der in Nordamerika beheimatet ist. Prähirhunde leben in etwa 15 m langen, tunnelförmigen Erdhöhlen mit zwei unterschiedlich geformten Ausgängen (siehe rechte Zeichnung in Abbildung 2.7). Ein Ausgang ist von einem hohen, konisch zulaufenden Ringwall umgeben, der andere Ausgang ist niedriger und flach. Die Form der unterirdischen Gänge ist ungünstig für eine Sauerstoffversorgung durch Wärmekonvektion. Der Sauerstoffvorrat, der durch Konvektion in die Höhle gelangt, reicht nicht einmal aus, um den Bedarf eines Tieres zu decken. Da aber mehrere Prähirhunde gemeinsam in einer Höhle leben, muss die Sauerstoffversorgung durch ein anderes Prinzip gewährleistet sein. Dies geschieht, ähnlich wie bei der Turmspinne, durch Druckunterschiede an den beiden Ausgängen: Streicht Wind über die Ausgänge der Höhle, muss er den erhöhten Ausgang als Hindernis umströmen. Es entstehen gekrümmte

Stromlinien und damit am erhöhten Ausgang ein Unterdruckgebiet. Der Druck am höherliegenden Ausgang ist niedriger als der Druck am flachen Höhlenausgang. Es entsteht eine Strömung vom Gebiet des höheren Drucks zum Gebiet niedrigeren Drucks, der Bau wird belüftet. Es reicht eine sehr geringe Windgeschwindigkeit aus, um die Luft im Bau innerhalb weniger Minuten auszutauschen. Die Belüftung ist unabhängig von der Windrichtung, die Luft strömt im Bau immer von der Stelle des höheren zur Stelle des niedrigeren Druckes. Wird die Strömung durch Rauch sichtbar gemacht, sieht man, dass dieser immer aus dem höheren der beiden Ausgänge steigt.

### **... im Spiel**

#### ***Versuch „Münze ins Glas blasen“:***

Eine möglichst leichte, großflächige Münze wird auf eine Tischplatte in der Nähe der Tischkante gelegt. Diese Münze soll nun durch Blasen in ein gekipptes Glas gehoben werden. Wird stark genug horizontal über die Münze geblasen, muss die Strömung um das Hindernis ausweichen und es entsteht durch die gekrümmten Stromlinien ein Unterdruckgebiet über der Münze. Ist die Münze einmal ein kleines Stück hochgehoben, kann die Luft auch unter die Münze strömen. Mit etwas Glück und einem langen Atem kann sie nun in das Glas „geblasen“ werden.

#### ***Versuch „Tischtennisball im Trichter“:***

Ein Tischtennisball kann in einem auf dem Kopf stehenden Trichter gehalten werden, wenn stark in die enge Öffnung des Trichters geblasen wird. Der Ball dient als Hindernis im Luftstrom, der durch die Verengung zwischen Ball und Trichterwand hindurchströmt. Durch das Ausweichen der Strömung entstehen gekrümmte Stromlinien und damit ein Unterdruck, der den Ball im Trichter hält.

#### ***Versuch: „Löffel im Wasserstrahl“:***

Ein Kaffeelöffel wird, nach unten hängend, locker in die Hand genommen. Nähert man den Löffel vorsichtig der Oberfläche des fließenden Wasserstrahls, kann man beobachten, dass die Löffelfläche in den Wasserstrahl gezogen und im Strahl gehalten wird.

### **... unterwegs**

Schirm: Wenn man mit einem Regenschirm bei stürmischem Wetter spazieren geht, kann es passieren, dass der Schirm umgestülpt wird. Der Wind streicht mit einer hohen Geschwindigkeit über den Schirm, der als Hindernis wirkt und die Stromlinien umlenkt. Es entsteht ein Unterdruck, der den Schirm umstülpt.

Schiffe und Züge: Wird ein Schiff auf See mit Treibstoff versorgt oder müssen Postsäcke ausgetauscht werden, ist es notwendig, dass zwei Schiffe eine Zeitlang parallel nebeneinander

herfahren. Dabei muss ein bestimmter Mindestabstand eingehalten werden, da man sonst selbst mit starken Manövrierbewegungen Schwierigkeiten hat, die Schiffe wieder zu trennen. Zur Erklärung kann das Bernoullische Gesetz herangezogen werden: Das anströmende Wasser strömt durch die Engstelle zwischen den beiden Schiffen. Dadurch erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit und dementsprechend verringert sich der Druck in der Verengung.

Den gleichen Effekt müssen die Planer der ICE-Strecken beachten: Zwei mit hoher Geschwindigkeit parallel nebeneinander vorbeifahrende Züge ziehen sich wegen des entstehenden Unterdruckes im Zwischenraum zwischen den Zügen an. Deshalb muss ein Mindestabstand zwischen den Gleisen eingehalten werden.

Auch in der Binnenschifffahrt kann man Phänomene beobachten, die auf das Gesetz von Bernoulli zurückzuführen sind: In einem Kanal, dessen Wassertiefe den Tiefgang der Schiffe nur knapp übersteigt, kann es passieren, dass bei schneller Fahrt das Schiff an den Grund des Kanals gesogen wird. Dies ist die Hauptursache für die baulichen Schäden an Kanälen.

### ***Versuch „Schiffe“:***

Schüssel mit Wasser füllen, zwei Spielzeugschiffe draufsetzen, mit Fäden stabilisieren. Zwischen den Schiffen mit einem Schlauch Wasser durchspritzen => Schiffe bewegen sich aufeinander zu.

### **... in der Akustik**

„Heulrohr“: Beim Heulrohr handelt sich um ein quergeriffeltes Kunststoffrohr von ca. einem Meter Länge, das im Spielzeughandel erhältlich ist. Dieses Rohr wird an einem Ende festgehalten und in der Luft kreisförmig geschwungen. Durch das Herumschleudern wird die Luft im Rohr, ähnlich einem herumgeschleuderten Stein, nach außen gezogen. Es entsteht eine Strömung im Rohr. Dabei gibt es einen sehr lauten Heulton von sich.

Wie entsteht dieser Heulton?

Die Luft muss an den Rillen im Rohrinernen vorbeiströmen, dabei entstehen Druckschwankungen, die eine Schallwelle erzeugen.

Durch den Luftstrom wird ein verrauschtes Frequenzspektrum angeregt. Wenn dieses breite Spektrum auf der Grundfrequenz des Rohres oder der Frequenz eines Obertons liegt, erhält man einen klaren Heulton (EHRlich 1985).

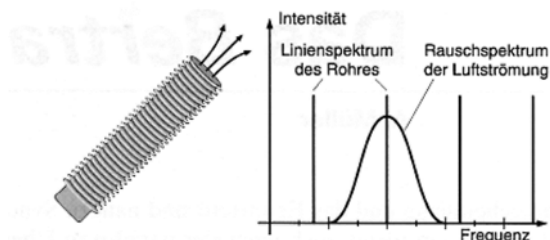


Abb. 2.8: Heulrohr. Eigenfrequenzen des Heulrohrs und darüberliegendes, verrauschtes Spektrum des Luftstroms

### 3.2.2 Reale, reibungsbehaftete Strömungen - Viskosität und Haftbedingung

#### VORBEMERKUNGEN

Dieser zweite Unterrichtsteil zeigt die Grenzen des Modells der idealen Flüssigkeit auf. In der Natur sind Strömungen immer reibungsbehaftet. Deshalb wird in diesem Unterrichtsteil die Viskosität als strömungsbeeinflussender Faktor eingeführt, auch im Hinblick auf den dritten, vierten und sechsten Themenblock dieser Unterrichtsreihe. Des Weiteren wird die Abhängigkeit der Viskosität von verschiedenen Parametern wie Temperatur oder Scherspannung thematisiert. Die Erkenntnis, dass die Viskosität nicht als Konstante betrachtet werden kann, führt zum Begriff der „nichtnewtonschen Flüssigkeiten“. Aus dieser großen Stoffklasse wurden speziell schubverdickende und -verdünnende Fluide ausgewählt.

#### LEHR- UND LERNZIELE

Die Schülerinnen, Schüler und Studierenden sollen

- die Grenzen des Modells einer idealen Flüssigkeit erkennen.
- die Viskosität als physikalische Größe und als wichtigen strömungsbeeinflussenden Faktor kennen lernen.
- erkennen, dass die Viskosität keine Konstante ist und dass sich manche Substanzen unter verschiedenen Voraussetzungen einmal wie ein Festkörper, dann wieder wie eine Flüssigkeit verhalten.
- Schubverdickende von schubverdünnenden Flüssigkeiten unterscheiden können.

#### AUSFÜHRUNG

**Demonstration:** Verschiedene Flüssigkeiten werden auf ihre Zähigkeit hin betrachtet.

Beim Vergleich verschiedener Flüssigkeiten wie Wasser, Glycerin, Honig, Motorenöl usw. stechen sofort gravierende Unterschiede ins Auge. Schon beim Umschütten der Flüssigkeiten von einem Gefäß in ein anderes zeigt sich, dass die Flüssigkeiten unterschiedlich zäh sind.

Um das Verhalten dieser Flüssigkeiten realistischer zu beschreiben, muss ihre Zähigkeit berücksichtigt werden. Für die Definition der Zähigkeit stellt man sich die Flüssigkeit aus Schichten aufgebaut vor, ähnlich wie aufeinandergestapelte Spielkarten. Diese Flüssigkeitsschichten der Dicke  $\Delta z$  befinden sich nun zwischen zwei Platten gleicher Fläche (Abbildung 2.9). Die untere Platte bleibt in Ruhe, während die obere Platte verschoben wird.

Bei einer idealen Flüssigkeit würde die Platte über die Flüssigkeitsschicht gleiten, ohne dass diese sich bewegt. Bei realen Flüssigkeiten aber wird der Bewegung der Platte eine Reibungskraft entgegengesetzt: Jede Schicht der Flüssigkeit reibt an ihren Nachbarschichten. Auf diese Weise werden auch von der Platte weiter entfernte Schichten bewegt. Diesen Prozess nennt man „**Scherung**“.

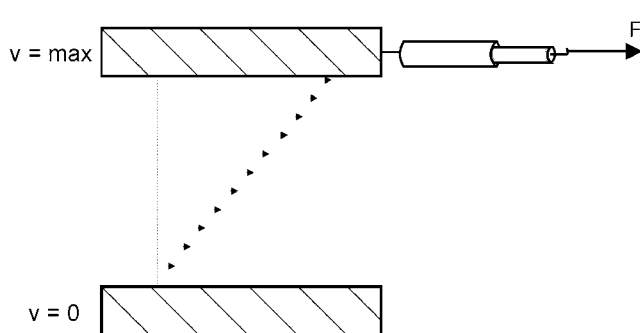


Abb. 2.9: Schichtweiser Aufbau einer Flüssigkeit zwischen zwei Platten.

Die Geschwindigkeit  $v$  der einzelnen Schicht ist umso kleiner, je weiter die Schicht von der oberen, bewegten Platte entfernt ist. Für die meisten Flüssigkeiten ändert sich die Geschwindigkeit zwischen den Platten linear.

Um den Widerstand zu überwinden, der durch die Reibung der Flüssigkeitsschichten untereinander entsteht und so die Geschwindigkeit konstant zu halten, muss ständig mit einer Kraft  $F$  gezogen werden.

Diese Kraft ist

- proportional zu dem Geschwindigkeitsgefälle  $\Delta v/\Delta z$ . D.h. je stärker sich die Geschwindigkeit mit der Schichthöhe ändern soll, desto größer muss die angreifende Kraft sein.
- proportional zur Fläche  $A$  der Schicht.

$$\vec{F} \sim A \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta z}$$

Der Proportionalitätsfaktor ist die sog. „**Zähigkeit**“ oder auch „**dynamische Viskosität**“. Bezeichnet wird sie mit dem griechischen Buchstaben  $\eta$  (eta).

Ihre Einheit ist  $\text{Pa s} = \text{Ns/m}^2 = \text{kg / s m}$ .

Damit lautet die Formel für die innere Reibungskraft:  $F = \eta A \frac{\Delta v}{\Delta z}$ . Für sehr dünne Schichten kann das Geschwindigkeitsgefälle als Differentialquotient geschrieben werden:

$$F = \eta A \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta z} = \eta A \frac{dv}{dz}$$

Diese Beziehung wird auch das „**Newtonsche Reibungsgesetz**“ genannt.

Die innere Reibung ist der Widerstand, den die Flüssigkeit bei einer **Schergeschwindigkeit**  $dv/dz$  dem Fließen entgegensetzt.

Tabelle 2.1 zeigt die Viskosität verschiedener Stoffe. Die zusätzliche Angabe der Temperatur deutet schon darauf hin, dass die Viskosität keine Konstante ist, sondern von der Temperatur des Mediums abhängt.

Solche Fluide, wie Luft und Wasser, die dem Newtonschen Reibungsgesetz gehorchen und deren Viskosität lediglich von der Temperatur und dem Druck abhängt, werden auch „**ideal viskos**“ genannt. Es handelt sich um die sogenannten „**newtonschen Fluide**“.

Stoff (Flüssigkeiten)	Temperatur (°C)	Viskosität $\eta$ ( $10^{-3}$ Pa s)
Äther	20	0,23
Wasser	20	1,006
Petroleum	20	1,46
Terpentin	20	1,49
Quecksilber	20	1,55
Glyzerin 20%	20	1,76
Glyzerin 60%	20	10,8
Glyzerin 100%	20	$1,41 \cdot 10^3$
Pech	20	$3 \cdot 10^{10}$
Blut	37	$\approx 4$

Stoff (Gase)	Temperatur (°C)	Viskosität $\eta$ ( $10^{-6}$ Pa s)
Wasserstoff	20	9,5
Ammoniak	20	10,8
Methan	20	12
Kohlendioxid	20	16
Luft	20	18,1
Stickstoff	20	18,4
Sauerstoff	20	20,9

Tabelle 2.1: Viskosität verschiedener Flüssigkeiten und Gase

In der Literatur wird wegen der einfacheren Dimension häufig statt der dynamischen Viskosität die kinematische Viskosität verwendet. Es handelt sich bei dieser Größe lediglich um die dynamische Viskosität dividiert durch die Dichte. Die **kinematische Viskosität** wird mit dem Buchstaben  $\nu$  bezeichnet:

$$\nu = \eta / \rho \quad \left[ \nu = \frac{\eta}{\rho} \right] = \frac{\text{Pa s}}{\text{kg} / \text{m}^3} = \frac{\text{Ns} / \text{m}^2}{\text{kg} / \text{m}^3} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Diese Unterrichtsreihe verwendet im weiteren die dynamische Viskosität. Der Einfachheit halber wird der Zusatz „dynamisch“ weggelassen, weil keine Verwechslungen möglich sind.



### Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur bei Flüssigkeiten

Oft wird im Alltag ausgenutzt, dass Flüssigkeiten beim Erwärmen dünnflüssiger und beim Abkühlen wieder zäh werden, z.B. Honig bei der Weihnachtsbäckerei oder Asphalt im Straßenbau. Die Viskosität von Flüssigkeiten nimmt also mit steigender Temperatur ab. Dass dieses Verhalten aber nicht nur zähe, klebrige Flüssigkeiten an den Tag legen, zeigt die folgende Tabelle und die dazugehörige Abbildung: Die Viskosität von Wasser sinkt bei einer Temperaturerhöhung von Raumtemperatur auf 100°C exponentiell auf fast  $\frac{1}{4}$  des ursprünglichen Wertes ( $\eta = Ae^{\frac{b}{T}}$ ; A und b sind Materialkonstanten).

Temperatur (°C)	Viskosität $\eta$ ( $10^{-3}$ Pa s)
0	1,79
20	1
40	0,65
60	0,46
80	0,35
100	0,28

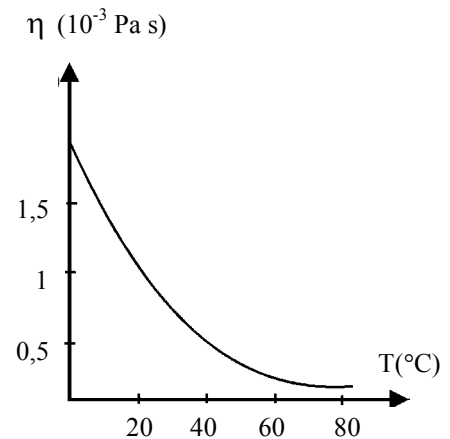


Tabelle 2.2: Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Wasser

Wie kann man sich diese Abhängigkeit erklären? Der Widerstand der Flüssigkeit gegen die Scherung wird vor allem durch intermolekulare Kräfte verursacht. Wenn die Temperatur steigt, dehnen sich Flüssigkeiten aus, mit Ausnahme des Wassers zwischen 0° und 4°C (Anomalie des Wassers). Der mittlere Abstand zwischen den Molekülen wächst und die mittlere Anziehungskraft sinkt. Die Viskosität nimmt ab.

Es gibt keine allgemeingültige Formel, die das Temperaturverhalten der Viskosität aller newtonschen Flüssigkeiten beschreibt. Zwar existieren verschiedene empirisch gefundene Zusammenhänge, allerdings gelten sie nur für begrenzte Temperaturbereiche (SCHADE et al. 1980, 22).

Was passiert, wenn man Motorenöl erwärmt? Eine wichtige Eigenschaft des Motorenöls ist, dass seine Viskosität über weite Temperaturbereiche konstant bleibt. Dies wird erreicht, indem dem Öl Polymere zugesetzt werden. Diese Polymere zeigen ein zu den üblichen Flüssigkeiten komplementäres Verhalten: Ihre Viskosität nimmt mit steigender Temperatur ab. Durch die Zugabe dieses „Additivs“ kann die Viskosität der Mischung halbwegs konstant gehalten werden.

### Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur bei Gasen

Im Gegensatz zu Flüssigkeiten nimmt bei Gasen die Viskosität mit steigender Temperatur zu, da die Querbewegung, die thermische Bewegung der Gasmoleküle quer zur Hauptströmung,

zunimmt. Die mittlere Stoßzeit, d.h. die Zeit zwischen den Stößen der Teilchen wird mit zunehmender Temperatur immer kleiner. Die Stöße bewirken, dass Teilchen beschleunigt oder abgebremst werden, es herrscht ein verstärkter Impulsaustausch zwischen den Molekülen. Dieser Effekt wirkt sich wie eine zusätzliche Zähigkeit aus.

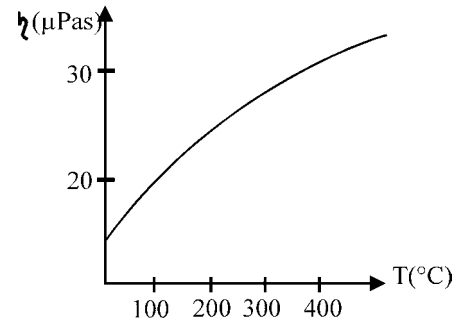


Abb. 2.10: Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Luft

Die Viskosität von Flüssigkeiten und Gasen zeigt ein entgegengesetztes Temperaturverhalten. Bei Flüssigkeiten nimmt die Viskosität mit steigender Temperatur ab. Bei Gasen nimmt die Viskosität mit steigender Temperatur zu.

Die Viskosität ist nicht nur temperatur-, sondern auch druckabhängig. Im Gegensatz zur Temperaturabhängigkeit der Viskosität macht sich die Druckabhängigkeit erst bei großen Drücken bemerkbar.

### Haftbedingung

In unserem Gedankenexperiment zur Scherung (Abbildung 2.9) bewegt sich die oberste Flüssigkeitsschicht direkt an der bewegten Platte mit deren Geschwindigkeit. D.h. sie haftet an der Berandung. Dasselbe gilt für die Schicht direkt an der unteren Platte: Sie hat wie diese die Geschwindigkeit null. Diese sog. „Haftbedingung“ konnte man schon in den Versuchen zum ersten Themenblock „Wirbel“ beobachten: Schwimmer, wie Streichholzköpfe oder Konfetti, hatten direkt an der Wand die Geschwindigkeit null, da die direkt benachbarte Flüssigkeitsschicht am Glas haftete. Die Haftbedingung ist unabhängig vom Material des Gefäßes.

### Messung der Viskosität mit dem Kugelfallviskosimeter

#### Versuch „Kugelfallviskosimeter“:

Um die Viskosität einer Flüssigkeit zu messen, gibt es eine einfache Methode: Man füllt die Flüssigkeit in einen hohen Behälter und läßt ein Kügelchen hindurchfallen.

Das bewegte Kügelchen reißt benachbarte Flüssigkeitsschichten mit. Nach der Haftbedingung hat die erste Schicht direkt an der Kugel deren Geschwindigkeit. Weiter nach außen hin nimmt die Geschwindigkeit ab. Diesen Bereich der Flüssigkeit, in dem durch die Scherung ein Geschwindigkeitsgefälle entsteht, nennt man „**Grenzschicht**“. Sie hat bei der fallenden Kugel eine Ausdehnung, die ungefähr in der Größenordnung des Kugelradius  $r$  liegt.

So kann man das Geschwindigkeitsgefälle abschätzen:  $\frac{dv}{dz} = \alpha \frac{v}{r}$ .

$\alpha$  ist ein noch unbekannter Faktor mit der Größenordnung 1.

Damit gilt für den Widerstand, den die Flüssigkeit der fallenden Kugel entgegensetzt:

$$F = \eta A \frac{dv}{dz} = \alpha \eta 4\pi r^2 \frac{v}{r}.$$

Eine genauere, aber wesentlich kompliziertere Herleitung liefert die exakte Beziehung und damit auch den Wert für  $\alpha$ :

$$\boxed{F = 6\pi\eta vr}, \quad \alpha = 1,5.$$

Dies ist das **Stokes-Gesetz** für die laminare Umströmung einer Kugel. Für andere Körper- und andere Strömungsformen ist es noch schwieriger, den Strömungswiderstand zu finden. Im 4. Themenblock „Umströmte Körper“ wird genauer darauf eingegangen.

Auf eine Kugel, die in einer Flüssigkeit oder einem Gas fällt, wirken neben der Reibungskraft  $F_R$  die Gewichtskraft  $F_G$  und die Auftriebskraft  $F_A$ :

$$m\ddot{x} = F_G - F_A - F_R.$$

Am Anfang der Fallbewegung ist die Geschwindigkeit der Kugel und damit auch der Widerstand null. Mit der Beschleunigung der Kugel durch die Schwerkraft nimmt auch der Strömungswiderstand durch innere Reibung zu, bis Auftriebskraft und Widerstand die Beschleunigung ausgleichen und der Körper mit konstanter Geschwindigkeit  $v_e$  fällt. Dann ist

$$F_G - F_A = F_R$$

Mit der Dichte der Kugel  $\rho_K$  und der Dichte der Flüssigkeit  $\rho_F$  gilt:

$$F_G - F_A = (\rho_K - \rho_F) V g = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_K - \rho_F)$$

und durch Gleichsetzen mit  $F_R$  erhält man die Sinkgeschwindigkeit  $v_e$ :

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_K - \rho_F) = 6\pi\eta v_e r$$

$$v_e = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{\eta} (\rho_K - \rho_F)$$

Mißt man nun diese konstante Endgeschwindigkeit der Kugel, kann die Viskosität der Flüssigkeit, in der die Kugel fällt, bestimmt werden:

$$\boxed{\eta = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{v_e} (\rho_K - \rho_F)}.$$

Bei der Durchführung des Versuchs muss darauf geachtet werden, dass der Durchmesser des Standzylinders wesentlich größer ist als der Durchmesser des Kügelchens, damit keine Störungen durch die Berandung auftreten. Mit Hilfe dieses Versuchs kann untersucht werden, dass die Viskositätswerte stark von der Temperatur abhängen.

### Nichtnewtonsche Flüssigkeiten

Es existieren Stoffe, deren Viskosität nicht nur von der Temperatur abhängt, sondern zusätzlich von anderen Faktoren, wie der Schergeschwindigkeit  $\Delta v / \Delta z$ , mit der die Flüssigkeitsteilchen gegeneinander verschoben werden.

**Demonstration „hüpfender Kitt“:** Ein Beispiel für eine solche Flüssigkeit ist der sog. „hüpfende Kitt“. Es handelt sich um eine sehr zähe „Knetmasse“ mit ungewöhnlichen Eigenschaften: Ruht der Kitt in einem Gefäß oder in der Hand, fließt er unter dem Einfluss der Schwerkraft wie eine Flüssigkeit. Wird er aber zu einer Kugel geformt und gegen die Wand geworfen, springt er zurück wie ein Ball. Nimmt man den Kitt aber in beide Hände und reißt ihn auseinander, bricht er und zeigt eine glatte Bruchstelle. Offensichtlich verhält sich dieses Material unter veränderter Krafteinwirkung unterschiedlich. Seine Viskosität nimmt mit der Schergeschwindigkeit  $\Delta v/\Delta z$  zu. Die Viskosität ist bei gleichbleibender Temperatur nicht mehr konstant. Zwischen der Schergeschwindigkeit und der inneren Reibung besteht kein linearer Zusammenhang mehr. Das newtonsche Reibungsgesetz gilt nicht mehr.

Flüssigkeiten, deren Viskosität steigt, wenn die Schergeschwindigkeit zunimmt, nennt man **„schubverdickend“**, sie gehören zu der Klasse der **„nichtnewtonschen Fluide“**.

Der hüpfende Kitt besteht aus Polymerketten, die elektrisch unterschiedlich geladen sind. Wird der Kitt großen Kräften ausgesetzt, nähern sich diese Ladungen so weit, dass sich Vernetzungsstellen bilden. Je größer die Schergeschwindigkeit, desto mehr Vernetzungsstellen, desto härter ist der Kitt, er verhält sich wie ein Festkörper. Kleine Schergeschwindigkeiten dagegen reichen nicht aus, um genügend Vernetzungsstellen zu bilden, der Kitt verhält sich wie eine zähe Flüssigkeit.

Weitere Beispiele für schubverdickende Fluide sind nasser Sand in den man einsinkt, wenn man stehen bleibt, der jedoch beim raschen Laufen unter den Füßen fest wird oder Teer in dem ein Stein versinken kann, der aber unter der Einwirkung eines schnellen Schlages erhärtet. Auch eine Stärke-Wasser-Mischung zeigt ähnliche Eigenschaften: Wenn man mit der flachen Hand auf die Flüssigkeit schlägt, spritzt sie nicht, sondern verhält sich zäh.

Im Alltag existieren neben schubverdickenden auch **„schubverdünnende Flüssigkeiten“**. Ein recht spektakuläres Beispiel gibt es im Spielwarenhandel zu kaufen. Es ist eine klebrige, wackelpuddingartige Masse („Slime“), die in der Hand eine feste Form hat. Wirft man diese aber an eine Fensterscheibe oder einen Spiegel (bitte nicht an die Wand, sie geht nie wieder ab), zerläuft sie wie eine Flüssigkeit und hinterlässt einen großen runden Fleck bevor sie wieder in ihre alte Form zurückspringt. Das heißt, diese Substanz verringert ihre Viskosität unter dem

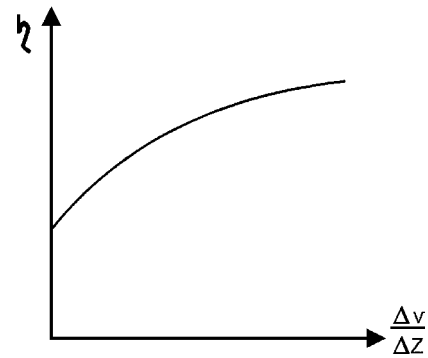


Abb 2.11: Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit bei schubverdickenden Fluiden

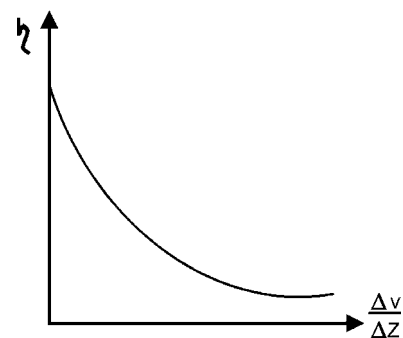


Abb 2.12: Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit bei schubverdünnenden Fluiden

Einfluss einer erhöhten Schergeschwindigkeit: Je größer diese Geschwindigkeit, desto dünnflüssiger wird die Substanz.

Blut ist ein weiteres Beispiel für schubverdünnende Flüssigkeiten. Bei Blut handelt es sich um eine Suspension: Die festen Bestandteile, die Blutkörperchen, schwimmen in dünnflüssigem Blutplasma. Die roten Blutkörperchen sind scheibenförmig. Bei kleinen Geschwindigkeiten sind sie zufällig orientiert. Bei großen Geschwindigkeiten aber richten sie sich in Strömungsrichtung aus. Dadurch nimmt die Viskosität ab.

Weitere Beispiele für schubverdünnende Fluide im Alltag: Ketchup wird dünnflüssiger, wenn man es schüttelt. Kugelschreibertinte darf nur fließen, wenn geschrieben wird. Auch Margarine wird beim Streichen und Wandmalfarbe beim Rühren dünnflüssiger. Der Mechanismus ähnelt sich bei allen diesen Fluiden: Entweder bestehen sie aus asymmetrischen Molekülen, die sich unter Einfluß einer erhöhten Schergeschwindigkeit ausrichten, aus langen Molekülketten, die entknäult werden, oder es werden intermolekulare Bindungen aufgebrochen (WALKER 1979; SCHADE et al. 1980, 19; RITTER et al. 1979, 19; BOHL 1991, 18).