- Mit über 3.000 Aufgaben
- Ausführliche Lösungswege im Internet zum Download

Physik

Lehr- und Übungsbuch

3., aktualisierte Auflage

Douglas C. Giancoli

WWW.PEARSON-STUDIUM.DE CWS COMPANION WEBSITE

ALWAYS LEARNING

PEARSON

Douglas C. Giancoli

Physik

Lehr- und Übungsbuch

3., aktualisierte Auflage

Aus dem Amerikanischen von Micaela Krieger-Hauwede, Karen Lippert, Ulrike Pahlkötter und Detlef Scholz

Bearbeiter der deutschen Ausgabe
Oliver Eibl, Jörg Ihringer und Ulrich Behn

PEARSON

Higher Education

München • Harlow • Amsterdam • Madrid • Boston
San Francisco • Don Mills • Mexico City • Sydney

a part of Pearson plc worldwide

$\Delta m_1/\Delta t$ durch die Fläche A_1

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\rho_1 \Delta V_1}{\Delta t} = \frac{\rho_1 A_1 \Delta l_1}{\Delta t} = \rho_1 A_1 v_1 \,.$$

Dabei ist $\Delta V_1 = A_1 \Delta l_1$ das Massevolumen von Δm_1 und ρ_1 die Dichte des Fluids. Analog dazu beträgt der Massenstrom im Punkt 2 (durch die Fläche A_2) $\rho_2 A_2 v_2$. Da kein Fluid seitlich einströmt oder hinausfließt, müssen die Massenströme durch A_1 und A_2 gleich sein. Da

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t}$$

ist, gilt somit

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \,.$$

Kontinuitätsgleichung

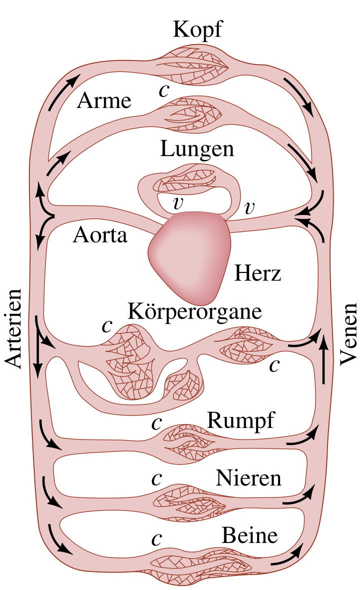
Dies ist die so genannte **Kontinuitätsgleichung**. Wenn das Fluid inkompressibel ist (ρ ändert sich nicht mit dem Druck), was eine ausgezeichnete Näherung für Flüssigkeiten (und manchmal auch für Gase) unter den meisten Bedingungen darstellt, dann ist $\rho_1 = \rho_2$ und die Kontinuitätsgleichung wird zu

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \,. \quad (\rho = \text{konstant}) \tag{13.7}$$

Beachten Sie, dass das Produkt Av den *Volumenstrom* (das Volumen an Fluid, das einen bestimmten Punkt pro Sekunde durchströmt) darstellt, da $\Delta V/\Delta t = A\Delta l/\Delta t = Av$. Die SI-Einheit ist m^3/s. Die Gleichung 13.7 besagt, dass bei einem großen Querschnitt die Geschwindigkeit gering ist, während bei einem kleinen Querschnitt die Geschwindigkeit hoch ist. Das wird deutlich, wenn man einen Fluss betrachtet. Ein Fluss fließt langsam durch eine Wiese, wo das Flussbett breit ist, erreicht aber eine hohe Geschwindigkeit, wenn er durch eine enge Schlucht hindurchströmt.

ANGEWANDTE PHYSIK

Blutfluss



v = Klappen
c = Kapillaren

Abbildung 13.22 Der menschliche Blutkreislauf.

Beispiel 13.12 · Abschätzung — Blutfluss

Im menschlichen Körper fließt Blut vom Herzen in die Aorta und von dort in die großen Arterien. Diese verzweigen in die kleinen Arterien (Arteriolen), die ihrerseits in unzählige kleine Kapillaren verzweigen, siehe ► Abbildung 13.22. Das Blut fließt durch die Venen zum Herzen zurück. Die Aorta hat einen Radius von ca. 1,0 cm und das Blut fließt mit einer Geschwindigkeit von ca. 30 cm/s hindurch. Eine typische Kapillare hat einen Radius von ca. $4 \cdot 10^{-4}$ cm und das Blut fließt mit einer Geschwindigkeit von ca. $5 \cdot 10^{-4}$ m/s hindurch. Schätzen Sie ab, wie viele Kapillaren es im Körper gibt.

Lösung

A_1 ist die Fläche der Aorta und A_2 die Fläche *aller* Kapillaren, durch die Blut fließt. Dann ist $A_2 = N\pi r_{\text{Kap}}^2$, wobei N die Anzahl der Kapillaren und $r_{\text{Kap}} \approx 4 \cdot 10^{-4}$ cm der geschätzte Radius einer Kapillare ist. Die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 13.7) liefert

$$v_2 A_2 = v_1 A_1$$

$$v_2 N \pi r_{\text{Kap}}^2 = v_1 \pi r_{\text{Aorta}}^2 \,,$$

so dass

$$N = \frac{v_1}{v_2}\frac{r_{\text{Aorta}}^2}{r_{\text{Kap}}^2} = \left(\frac{0{,}30\,\text{m/s}}{5 \cdot 10^{-4}\,\text{m/s}}\right)\left(\frac{1{,}0 \cdot 10^{-2}\,\text{m}}{4 \cdot 10^{-6}\,\text{m}}\right)^2 \approx 4 \cdot 10^9 \,,$$

d. h. ca. 4 Milliarden Kapillaren.

Im Folgenden finden wir ein weiteres Beispiel, das die Kontinuitätsgleichung und das Argument, das zu ihr führt, anwendet.

Beispiel 13.13 **Heizungsrohr zu einem Raum**

Wie groß muss ein Heizungsrohr sein, wenn die Luft, die sich durch das Rohr mit 3,0 m/s bewegt, die Luft in einem Raum mit einem Volumen von 300 m^3 alle 15 Minuten wieder auffrischen kann? Nehmen Sie an, dass die Dichte der Luft konstant bleibt.

Lösung

Wir können die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 13.7) anwenden, wenn wir den Raum (nennen wir ihn Punkt 2) als einen großen Abschnitt des Rohres betrachten, siehe ► Abbildung 13.23. Wenn wir in derselben Weise argumentieren, die uns zur Gleichung 13.7 geführt hat (Änderung von Δt zu t), sehen wir, dass $A_2 v_2 = A_2 l_2/t = V_2/t$ ist. Dabei ist V_2 das Volumen des Raums. Dann ist $A_1 v_1 = A_2 v_2 = V_2/t$ und

$$A_1 = \frac{V_2}{v_1 t} = \frac{300\,\mathrm{m}^3}{(3{,}0\,\mathrm{m/s})(900\,\mathrm{s})} = 0{,}11\,\mathrm{m}^2\,.$$

Wenn das Rohr quadratisch ist, hat jede Seite die Länge $l = \sqrt{A} = 0{,}33$ m oder 33 cm. Ein rechteckiges Rohr mit den Abmessungen 20 cm · 55 cm ist auch passend.

ANGEWANDTE PHYSIK

Heizungsrohr

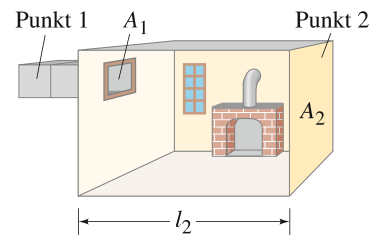


Abbildung 13.23 Beispiel 13.13.

13.8 Bernoulli'sche Gleichung

Haben Sie sich jemals gefragt, warum Rauch in einem Schornstein hochsteigt, warum sich das Verdeck eines Kabrios bei hohen Geschwindigkeiten aufbläht oder wie ein Segelboot sich gegen den Wind bewegen kann? Dies sind Beispiele für ein Gesetz, das Daniel Bernoulli (1700–1782) im frühen 18. Jahrhundert formuliert hat. Im Wesentlichen besagt das **Bernoulli'sche Gesetz**, dass, *wenn ein Fluid eine hohe Geschwindigkeit hat, der Druck niedrig ist, und dass, wenn die Geschwindigkeit niedrig ist, der Druck hoch ist*. Wenn die Druckwerte z. B. an den Punkten 1 und 2 in ► Abbildung 13.21 gemessen werden, wird man feststellen, dass der Druck am Punkt 2, wo die Geschwindigkeit höher ist, niedriger ist als am Punkt 1, wo die Geschwindigkeit niedriger ist. Auf den ersten Blick mag das merkwürdig erscheinen. Man könnte erwarten, dass die höhere Geschwindigkeit am Punkt 2 auch einen höheren Druck bedeuten würde. Aber das kann nicht sein. Denn wenn der Druck am Punkt 2 höher als am Punkt 1 wäre, würde dieser höhere Druck das Fluid verlangsamen, während es tatsächlich auf dem Weg zwischen Punkt 1 und Punkt 2 beschleunigt hat. Somit muss der Druck am Punkt 2 logischerweise geringer sein als am Punkt 1, wenn man die Tatsache berücksichtigt, dass das Fluid beschleunigt.

Bernoulli'sches Gesetz

Bernoulli entwickelte eine Gleichung, die dieses Gesetz quantitativ ausdrückt. Zur Herleitung der Bernoulli'schen Gleichung nehmen wir an, dass die Strömung stationär und laminar ist, dass das Fluid inkompressibel ist und dass die Viskosität so klein ist, dass sie vernachlässigt werden kann. Um eine allgemeingültige Gleichung zu erhalten, nehmen wir an, dass das Fluid in einer Röhre mit ungleichförmigem Querschnitt fließt, der über einem bestimmten Bezugspegel in der Höhe variiert, siehe ► Abbildung 13.24. Wir betrachten die farbig markierte Fluidmenge und berechnen die Arbeit, die verrichtet wird, um diese Menge von dem in (a) dargestellten Ort an den in (b) dargestellten Ort zu bewegen. In diesem Prozess fließt das Fluid am Punkt 1 einen Weg Δl_1 und zwingt das Fluid am Punkt 2,

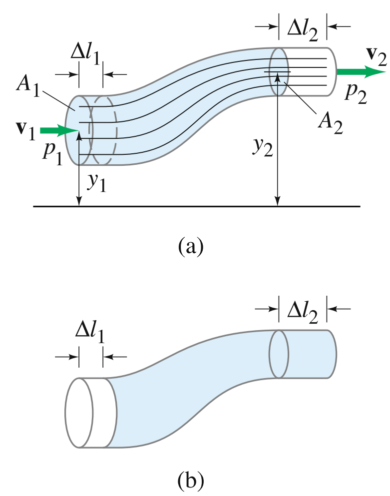


Abbildung 13.24 Fluidfluss: Herleitung der Bernoulli'schen Gleichung.

einen Weg Δl_2 zurückzulegen. Das Fluid links von Punkt 1 übt einen Druck p_1 auf unseren Fluidabschnitt aus und verrichtet eine Arbeit

$$W_1 = F_1 \Delta l_1 = p_1 A_1 \Delta l_1 \ .$$

Am Punkt 2 beträgt die an unseren Fluidabschnitt verrichtete Arbeit

$$W_2 = -p_2 A_2 \Delta l_2 \ .$$

Das negative Vorzeichen ist dadurch begründet, dass unser Fluidabschnitt Arbeit leistet (das farbig dargestellte Fluid verrichtet an dem Fluid rechts von Punkt 2 Arbeit). Die Gravitationskraft verrichtet ebenfalls Arbeit an dem Fluid. Da der Nettoeffekt des in ▸ Abbildung 13.24 dargestellten Prozesses darin besteht, eine Masse m mit dem Volumen $A_1 \Delta l_1 (= A_2 \Delta l_2$, da das Fluid inkompressibel ist) von Punkt 1 nach Punkt 2 zu bewegen, ist die durch die Gravitation verrichtete Arbeit

$$W_3 = -mg(y_2 - y_1) \ .$$

y_1 und y_2 sind die Höhen des Röhrenmittelpunktes über einem (beliebigen) Bezugspegel. Beachten Sie, dass in dem in ▸ Abbildung 13.24 dargestellten Fall dieser Term negativ ist, da die Bewegung aufwärts erfolgt und der Gravitationskraft entgegengerichtet ist. Somit beträgt die an dem Fluid verrichtete Nettoarbeit:

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$
$$W = p_1 A_1 \Delta l_1 - p_2 A_2 \Delta l_2 - mgy_2 + mgy_1 \ .$$

Laut dem Energieerhaltungssatz (Abschnitt 7.4) ist die an einem System verrichtete Nettoarbeit gleich der Änderung seiner kinetischen Energie. Somit gilt:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = p_1 A_1 \Delta l_1 - p_2 A_2 \Delta l_2 - mgy_2 + mgy_1 \ .$$

Die Masse m hat das Volumen $A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$. Folglich können wir $m = \rho A_1 \Delta l_1 = \rho A_2 \Delta l_2$ einsetzen und die Division durch $A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$ liefert

$$\frac{1}{2}\rho v_2^2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_1 - p_2 - \rho g y_2 + \rho g y_1 \ .$$

Das stellen wir um und erhalten

Bernoulli'sche Gleichung

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \ . \tag{13.8}$$

Dies ist die **Bernoulli'sche Gleichung**. Da die Punkte 1 und 2 zwei beliebige Punkte entlang einer durchflossenen Röhre sein können, kann die Bernoulli'sche Gleichung geschrieben werden als:

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

an jedem beliebigen Punkt in dem Fluid. Dabei ist y die Höhe des Röhrenmittelpunktes über einem festen Bezugspegel. (Beachten Sie, dass, wenn es keinen Fluss gibt ($v_1 = v_2 = 0$), sich die Gleichung 13.8 auf die hydrostatische Gleichung, Gleichung 13.6a, reduziert: $p_2 - p_1 = \rho g(y_2 - y_1)$.)

Die Bernoulli'sche Gleichung folgt aus dem Energieerhaltungssatz unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung. In dieser Form gilt sie nur für inkompressible Fluide.

ANGEWANDTE PHYSIK

Warmwasserheizungsanlage

Beispiel 13.14 Strömung und Druck in Warmwasserheizungsanlagen

Wasser zirkuliert in der Warmwasserheizungsanlage eines Hauses. Wie groß sind die Strömungsgeschwindigkeit und der Druck in einem Rohr mit einem Durchmesser von 2,6 cm in der zweiten Etage 5,0 m über dem Keller des Hauses, wenn das Wasser mit einer Geschwindigkeit von 0,50 m/s und einem

Druck von 3,0 bar durch ein Rohr mit einem Durchmesser von 4,0 cm im Keller gepumpt wird? Nehmen Sie an, dass die Rohre nicht verzweigen.

Lösung

Zunächst berechnen wir unter Anwendung der Kontinuitätsgleichung, Gleichung 13.7, die Strömungsgeschwindigkeit in der zweiten Etage und nennen sie v_2. Unter Beachtung der Tatsache, dass die Flächen proportional zu den Quadraten der Radien sind ($A = \pi r^2$), nennen wir den Keller Punkt 1 und erhalten

$$v_2 = \frac{v_1 A_1}{A_2} = \frac{v_1 \pi r_1^2}{\pi r_2^2} = (0{,}50\,\mathrm{m/s})\frac{(0{,}020\,\mathrm{m})^2}{(0{,}013\,\mathrm{m})^2} = 1{,}2\,\mathrm{m/s}\,.$$

Zur Ermittlung des Drucks wenden wir die Bernoulli'sche Gleichung an:

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \rho g(y_1 - y_2) + \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2) \\ &= (3{,}0 \cdot 10^5\,\mathrm{N/m^2}) + (1{,}0 \cdot 10^3\,\mathrm{kg/m^3})(9{,}8\,\mathrm{m/s^2})(-5{,}0\,\mathrm{m}) \\ &\quad + \frac{1}{2}(1{,}0 \cdot 10^3\,\mathrm{kg/m^3})\left[(0{,}50\,\mathrm{m/s})^2 - (1{,}2\,\mathrm{m/s})^2\right] \\ &= 3{,}0 \cdot 10^5\,\mathrm{N/m^2} - 4{,}9 \cdot 10^4\,\mathrm{N/m^2} - 6{,}0 \cdot 10^2\,\mathrm{N/m^2} \\ &= 2{,}5 \cdot 10^5\,\mathrm{N/m^2} \end{aligned}$$

oder 2,5 bar. Beachten Sie, dass der Geschwindigkeitsterm in diesem Fall nur eine sehr kleine Rolle spielt.

13.9 Anwendungen des Bernoulli'schen Gesetzes – von Torricelli zu Segelbooten, Tragflächen und dem Blutkreislauf

Es gibt zahlreiche Anwendungen, für die die Bernoulli'sche Gleichung Gültigkeit besitzt. Ein Beispiel ist die Berechnung der Geschwindigkeit v_1 einer Flüssigkeit, die aus einem Hahn im unteren Bereich eines Behälters ausströmt, siehe ► Abbildung 13.25. Wir wählen Punkt 2 in Gleichung 13.8 als Oberfläche der Flüssigkeit. Unter der Voraussetzung, dass der Durchmesser des Behälters im Vergleich zu dem des Hahns groß ist, ist v_2 näherungsweise null. Die Punkte 1 (Hahn) und 2 (Oberfläche) sind zur Atmosphäre hin offen, so dass der Druck an beiden Punkten gleich dem Atmosphärendruck ist: $p_1 = p_2$. Dann wird die Bernoulli'sche Gleichung zu

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = \rho g y_2$$

oder

$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)}\,. \tag{13.9}$$

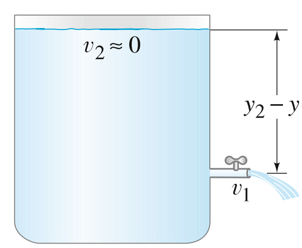


Abbildung 13.25 Das Gesetz von Torricelli: $v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)}$.

Gesetz von Torricelli

Dieses Ergebnis nennt man das **Gesetz von Torricelli**. Obwohl es ein spezieller Fall der Bernoulli'schen Gleichung zu sein scheint, wurde es 100 Jahre vor Bernoulli von Evangelista Torricelli, einem Schüler Galileis, entdeckt. Daher rührt die Bezeichnung dieses Gesetzes. Die Gleichung 13.9 besagt, dass die Flüssigkeit den Hahn mit derselben Geschwindigkeit verlässt, die ein aus derselben Höhe frei fallender Körper erreichen würde. Dies sollte nicht allzu überraschend sein, da die Herleitung der Bernoulli'schen Gleichung auf der Energieerhaltung basiert.

Ein anderer spezieller Fall der Bernoulli'schen Gleichung tritt auf, wenn ein Fluid horizontal fließt und sich dabei die Höhe nicht nennenswert ändert, d. h. $y_1 = y_2$. Dann wird die Gleichung 13.8 zu

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2\,. \tag{13.10}$$

ANGEWANDTE PHYSIK

Parfümzerstäuber

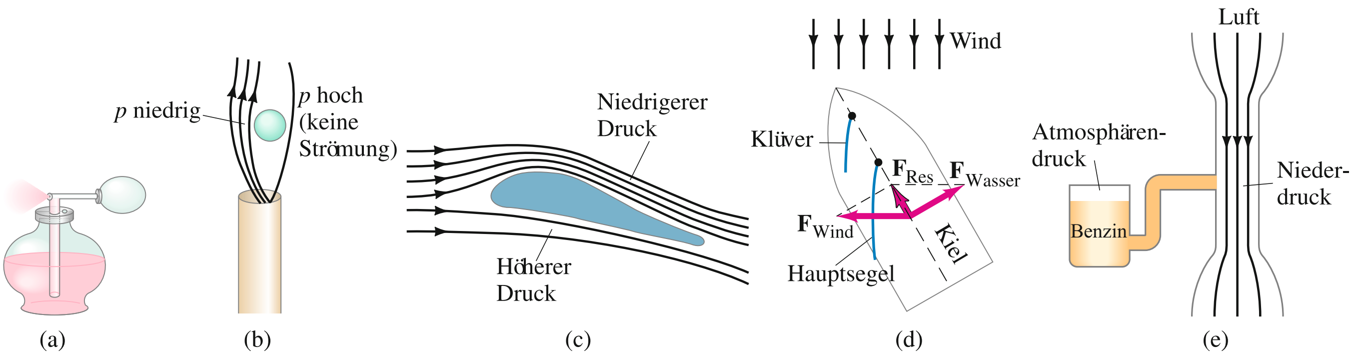


Abbildung 13.26 Beispiele für das Bernoulli'sche Gesetz: (a) Zerstäuber, (b) Tischtennisball im Luftstrahl, (c) Tragfläche eines Flugzeugs, (d) Segelboot, (e) Vergaserkörper.

Diese Gleichung besagt, dass bei hoher Geschwindigkeit des Fluids der Druck niedrig ist, und umgekehrt der Druck im Fluid ansteigt, wenn sich die Geschwindigkeit verringert. Druck im Fluid und Geschwindigkeit des Fluids hängen voneinander ab! Die Bernoulli'sche Gleichung erklärt viele allgemein bekannte Phänomene, von denen einige in ▸ Abbildung 13.26 veranschaulicht sind. Der Druck in der mit hoher Geschwindigkeit über das obere Ende der vertikalen Röhre eines Parfümzerstäubers geblasenen Luft (▸ Abbildung 13.26a) ist geringer als der normale Luftdruck, der auf die Oberfläche der Flüssigkeit in dem Gefäß wirkt. Infolge des reduzierten Drucks am oberen Ende der Röhre wird so Parfüm in der Röhre nach oben gedrückt. Ein Tischtennisball kann über einem blasenden Luftstrahl schweben (einige Staubsauger können Luft ausblasen), siehe ▸ Abbildung 13.26b. Wenn der Ball beginnt, den Wirkungsbereich des Luftstrahls zu verlassen, drückt der höhere Druck in der ruhigen Luft außerhalb des Strahls (Bernoulli'sches Gesetz) den Ball wieder zurück.

ANGEWANDTE PHYSIK

Flugzeuge und dynamischer Auftrieb

Tragflächen von Flugzeugen und andere Tragflächen, die sich schnell relativ zur Luft bewegen, lenken die Luft so ab, dass, obwohl die laminare Strömung größtenteils beibehalten wird, die Stromlinien über der Tragfläche zusammengedrängt werden, siehe ▸ Abbildung 13.26c. So wie die Flusslinien an einer Rohrverengung, wo die Geschwindigkeit hoch ist, zusammengedrängt werden (siehe ▸ Abbildung 13.21), so zeigen die zusammengedrängten Stromlinien über der Tragfläche an, dass die Geschwindigkeit der Luft über der Tragfläche höher ist als darunter. Folglich ist der Luftdruck über der Tragfläche niedriger als darunter und es ist eine nach oben gerichtete Nettokraft vorhanden, der so genannte **dynamische Auftrieb**. Das Bernoulli'sche Gesetz ist nur ein Aspekt des auf eine Tragfläche wirkenden Auftriebs. Tragflächen sind normalerweise leicht schräg nach oben gestellt, so dass die Luft, die auf die Unterseite trifft, nach unten abgelenkt wird. Die Änderung im Impuls der abprallenden Luftmoleküle führt zu einer zusätzlichen, nach oben gerichteten Kraft, die auf die Tragfläche wirkt. Turbulenzen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle.

ANGEWANDTE PHYSIK

Segeln gegen den Wind

Ein Segelboot kann sich gegen den Wind bewegen, siehe ▸ Abbildung 13.26d, und der Bernoulli'sche Effekt hilft beträchtlich dabei, wenn die Segel so gesetzt sind, dass die Luftgeschwindigkeit in der schmalen Verengung zwischen den beiden Segeln zunimmt. Der normale Atmosphärendruck hinter dem Hauptsegel ist größer als der reduzierte Druck davor (auf Grund der sich schnell bewegenden Luft in dem schmalen Schlitz zwischen den Segeln) und das drückt das Boot vorwärts. Beim Segeln gegen den Wind ist das Hauptsegel in einem solchen Winkel gesetzt, wie in ▸ Abbildung 13.26d dargestellt, dass die auf das Segel wirkende Nettokraft (Wind und Bernoulli) nahezu senkrecht zu dem Segel wirkt ($\mathbf{F}_{\text{Wind}}$). Das Boot würde sich dadurch seitwärts bewegen, wenn es nicht den Kiel gäbe, der sich unter Wasser vertikal nach unten erstreckt – denn das Wasser übt auf den Kiel eine Kraft ($\mathbf{F}_{\text{Wasser}}$) aus, die nahezu senkrecht zum Kiel verläuft. Die Resultierende dieser beiden Kräfte ($\mathbf{F}_{\text{Res}}$) zeigt, wie dargestellt, fast direkt vorwärts.

Ein **Venturi-Rohr** ist im Wesentlichen ein Rohr mit einer Verengung (dem Durchlass). Ein Beispiel für ein Venturi-Rohr ist der Körper eines Vergasers in einem Auto, siehe ▸ Abbildung 13.26e. Die durchströmende Luft beschleunigt beim Durchströmen dieser Verengung und so ist der Druck niedriger. Auf Grund des reduzierten Drucks wird das im Tank unter Atmosphärendruck befindliche Benzin in den Luftstrom in dem Durchlass gezogen und vermischt sich vor dem Eintritt in die Zylinder mit der Luft.

Das Venturi-Rohr ist auch die Grundlage für das *Venturimeter*, das zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit von Fluiden benutzt wird, siehe ▸ Abbildung 13.27. Venturimeter können zum Messen von Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen und Flüssigkeiten, einschließlich der Geschwindigkeit des Blutes in den Arterien, eingesetzt werden.

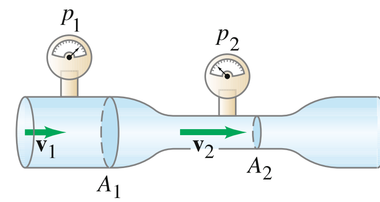


Abbildung 13.27 Venturimeter.

ANGEWANDTE PHYSIK

Rauch steigt in einem Schornstein hoch.

Warum steigt Rauch in einem Schornstein hoch? Zum Teil, weil warme Luft nach oben steigt (sie hat eine geringere Dichte und deshalb Auftrieb). Aber das Bernoulli'sche Gesetz spielt auch eine Rolle. Wenn Wind über das obere Ende eines Schornsteins bläst, ist der Druck dort geringer als im Haus. Folglich werden Luft und Rauch im Schornstein hochgedrückt. Selbst in einer scheinbar windstillen Nacht ist normalerweise eine ausreichende Luftströmung in der umgebenden Luft am oberen Ende eines Schornsteins vorhanden, um ein Aufsteigen von Rauch zu unterstützen.

ANGEWANDTE PHYSIK

Medizin - TIA

Eine der zahlreichen Anwendungen des Bernoulli'schen Gesetzes in der Medizin ist die Erklärung einer TIA, einer transitorischen ischämischen Attacke (eines zeitweiligen Mangels in der Blutzufuhr zum Gehirn), der durch das so genannte „Subclaviansteal-Syndrom" verursacht wird. Eine Person, die an einer TIA leidet, kann Symptome wie Schwindel, Doppeltsehen, Kopfschmerzen und Gliederschwäche erfahren. Eine TIA kann folgendermaßen entstehen. Normalerweise fließt Blut an der Rückseite des Kopfes über die beiden Arteriae vertebralis zum Gehirn hoch – es verläuft jeweils eine Arterie an jeder Seite des Nackens nach oben –, die zur Basisarterie direkt unter dem Gehirn zusammenlaufen, wie in ▸ Abbildung 13.28 dargestellt. Die Arteriae vertebralis gehen, wie dargestellt, von den Arteriae subclaviae ab, bevor letztere in die Arme abzweigen. Wenn ein Arm stark trainiert wird, wird der Blutfluss erhöht, um den Anforderungen der Armmuskeln gerecht zu werden. Wenn die Arteria subclavia auf einer Körperseite jedoch teilweise verstopft ist, z. B. durch Arteriosklerose, muss die Geschwindigkeit des Blutes auf dieser Seite höher sein, um das erforderliche Blut bereitzustellen. (Erinnern Sie sich an die Kontinuitätsgleichung: kleinere Fläche bedeutet höhere Geschwindigkeit bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit, Gleichung 13.7). Die erhöhte Geschwindigkeit des Blutflusses hinter der Öffnung zur Arteria vertebralis führt zu einem niedrigeren Druck (Bernoulli'sches Gesetz). So kann das Blut, das auf der „guten" Seite bei normalem Druck in der anderen Arteria vertebralis nach oben steigt, auf Grund des niedrigen Druckes auf der Seite nach unten in die andere Arteria vertebralis *umgeleitet werden* (Venturi-Effekt), anstatt nach oben in die Basisarterie und ins Gehirn zu fließen. Folglich kann die Blutzufuhr zum Gehirn auf Grund des „Subclaviansteal-Syndroms" reduziert werden: das sich schnell bewegende Blut in der Arteria subclavia „zapft" das Blut aus dem Gehirn „ab". Der daraus resultierende Schwindel oder die daraus folgende Schwäche hat normalerweise zur Folge, dass die Person mit dem Training aufhört und daraufhin eine Rückkehr in den Normalzustand erfolgt.

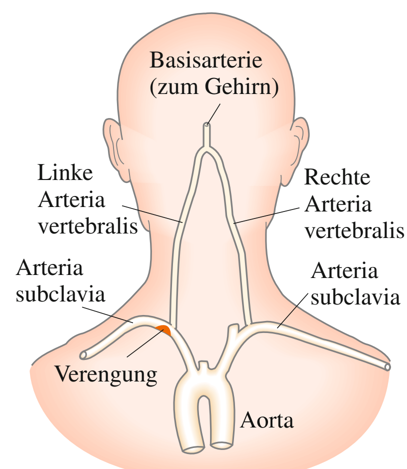


Abbildung 13.28 Rückseite von Kopf und Schulter, auf der die Arterien zu sehen sind, die zum Gehirn und zu den Armen führen. Eine hohe Geschwindigkeit des Blutflusses hinter der Verengung in der linken Arteria subclavia führt zu niedrigem Druck in der Arteria vertebralis, in der dann als Folge ein Rückfluss des Blutes (nach unten) auftreten kann: das so genannte „Subclaviansteal-Syndrom", aus dem eine TIA (siehe Text) resultiert.

ANGEWANDTE PHYSIK

Geruchverschluss am Waschbecken

Das Waschbecken, an dem Sie Ihre Zähne putzen, enthält einen *Geruchverschluss* – ein U-förmiges Rohr im Abfluss, das Wasser als Barriere gegen unangenehme Gerüche zurückhalten soll (▸ Abbildung 13.29a). Der Luftdruck ist auf Grund des *Hauptentlüftungsrohres*, das normalerweise nach oben zum Dach führt, auf beiden Seiten des Geruchverschlusses gleich. Dennoch könnte das Wasser in dem Geruchverschluss mittels Bernoulli-Effekt aus diesem Geruchverschluss hinausgedrückt werden, wenn Spülwasser von oben mit hoher Geschwindigkeit – und niedrigem Druck – durchströmt, wie in ▸ Abbildung 13.29b dargestellt. Bauvorschriften besagen, dass Abflüsse dieses Typs ein separates Entlüftungsrohr haben

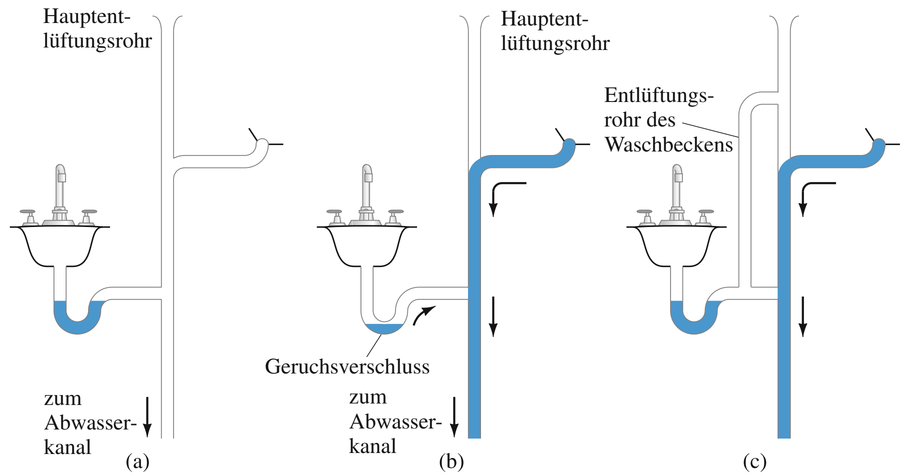


Abbildung 13.29 Sicherstellen, dass ein Geruchverschluss funktioniert.

müssen (► Abbildung 13.29c), das den Atmosphärendruck auf beiden Seiten des Geruchverschlusses aufrechterhält, selbst wenn Spülwasser das System durchströmt.

Nach diesen Beispielen wollen wir uns wieder den Grundlagen der Bernoulli'schen Gleichung zuwenden. Die Bernoulli'sche Gleichung vernachlässigt die Auswirkungen der Reibung (Viskosität) und die Kompressibilität des Fluids. Die Energie, die durch die Kompression in interne (oder potentielle) Energie und infolge der Reibung in Wärme umgewandelt wird, kann berücksichtigt werden, indem man Terme auf der rechten Seite der Gleichung 13.8 hinzufügt. Es ist schwierig, diese Terme theoretisch zu berechnen. Deshalb werden sie normalerweise empirisch bestimmt. Sie ändern die Erklärungen für die oben beschriebenen Phänomene nicht wesentlich.

13.10 Viskosität

Wie bereits erwähnt, tritt bei realen Fluiden innere Reibung auf, die man **Viskosität** nennt. Viskosität tritt sowohl in Flüssigkeiten, als auch in Gasen auf und ist eine Reibungskraft zwischen benachbarten Fluidschichten, wenn die Schichten sich aneinander vorbeibewegen. In Flüssigkeiten ist die Viskosität auf Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen zurückzuführen. In Gasen wird sie durch Stöße zwischen Molekülen verursacht.

Unterschiedliche Fluide besitzen ein unterschiedliches Maß an Viskosität: Sirup besitzt eine größere Viskosität als Wasser, Schmierfett besitzt eine größere Viskosität als Motoröl und Flüssigkeiten besitzen im Allgemeinen eine wesentlich größere Viskosität als Gase. Die Viskosität unterschiedlicher Fluide kann quantitativ durch die *dynamische Viskosität* η (das kleine Eta aus dem griechischen Alphabet) ausgedrückt werden, die folgendermaßen definiert wird. Eine dünne Fluidschicht wird zwischen zwei flachen Platten angebracht. Die eine Platte ruht z. B. auf einem Tisch, die andere wird bewegt, siehe ► Abbildung 13.30. Das Fluid, das sich in direktem Kontakt mit jeder Platte befindet, wird durch die Adhäsionskraft zwischen den Molekülen der Flüssigkeit und der Platte an der jeweiligen Oberfläche festgehalten. So bewegt sich die oberste Schicht des Fluids mit derselben Geschwindigkeit v, wie die obere Platte, während das Fluid, das Kontakt mit der ruhenden Platte hat, stationär bleibt. Die stationäre Fluidschicht verzögert den Fluss der Schicht direkt über ihr, diese Schicht wiederum verzögert den Fluss der nächsten Schicht etc. Somit variiert die Geschwindigkeit ständig, wie dargestellt, zwischen 0 und v. Der Quotient aus Geschwindigkeitszunahme und dem Weg, über den diese Änderung erfolgt, – gleich v/l – ist der so genannte *Geschwindigkeitsgradient*. Um die obere Platte zu bewegen, ist eine Kraft erforderlich, die man

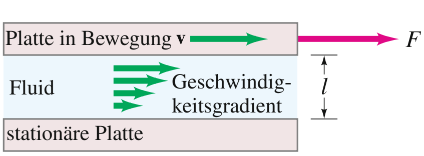


Abbildung 13.30 Bestimmung der Viskosität.

Tabelle 13.3

Dynamische Viskosität verschiedener Fluide

Fluid	Temperatur (°C)	Dynamische Viskosität η (Pa·s) [a]
Wasser	0	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
	20	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$
	100	$0{,}3 \cdot 10^{-3}$
Blut	37	$\approx 4 \cdot 10^{-3}$
Blutplasma	37	$\approx 1{,}5 \cdot 10^{-3}$
Ethylalkohol	20	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$
Motoröl (SAE 10)	30	$200 \cdot 10^{-3}$
Glyzerin	20	$1500 \cdot 10^{-3}$
Luft	20	$0{,}018 \cdot 10^{-3}$
Wasserstoff	0	$0{,}009 \cdot 10^{-3}$
Wasserdampf	100	$0{,}013 \cdot 10^{-3}$

[a] 1 Pa·s = 10 p = 1000 cp

messen kann, indem man eine flache Platte über eine Pfütze oder Sirup auf einem Tisch bewegt. Man stellt fest, dass bei einem bestimmten Fluid die erforderliche Kraft F proportional zu der Fluidfläche A, die sich in Kontakt mit jeder Platte befindet, und zu der Geschwindigkeit v sowie umgekehrt proportional zum Abstand l der Platten ist: $F \propto vA/l$. Für unterschiedliche Fluide gilt, dass je größer die Viskosität eines Fluids ist, desto größer die erforderliche Kraft ist. Folglich ist die Proportionalitätskonstante für diese Gleichung als *dynamische Viskosität* η definiert:

$$F = \eta A \frac{v}{l} \,. \tag{13.11}$$

Die Auflösung nach η liefert $\eta = Fl/vA$. Die SI-Einheit für η ist $\mathrm{N \cdot s/m^2 = Pa \cdot s}$ (Pascalsekunde). Im cgs-System ist die Einheit $\mathrm{dyn \cdot s/cm^2}$ und diese Einheit wird eine *Poise* (p) genannt. Viskosität wird immer noch häufig im cgs-System und in Zentipoise ($1\,\mathrm{cp} = 10^{-2}\,\mathrm{p}$) angegeben. In Tabelle 13.3 ist die dynamische Viskosität für verschiedene Fluide angegeben, die Viskosität ist stark temperaturabhängig. Die Viskosität von Flüssigkeiten, wie z. B. Motoröl, nimmt rapide ab, wenn die Temperatur steigt.[5]

13.11 Strömung in Rohren – Poiseuille'sche Gleichung

Wenn ein Fluid keine Viskosität besitzen würde, könnte es durch ein horizontales Rohr oder eine horizontale Röhre fließen, ohne dass Kraft ausgeübt werden müsste. Auf Grund der Viskosität ist ein Druckunterschied zwischen den Enden eines Rohres für den stationären Fluss jedes realen Fluids erforderlich, sei es Wasser oder Öl in einem Rohr oder Blut im menschlichen Blutkreislauf, selbst wenn es sich um ein horizontales Rohr handelt.

5 Die *Society of Automotive Engineers* gibt die Viskosität von Ölen durch die Zuordnung von Nummern an: 30-W (SAE 30) besitzt eine größere Viskosität als 10-W. Mehrbereichsöle, wie z. B. 20–50, sind so ausgelegt, dass sie die Viskosität bei einem Temperaturanstieg beibehalten. 20–50 bedeutet, dass das Öl 20-W ist, wenn es kühl ist, dass es aber wie ein 50-W reines Öl ist, wenn es heiß ist (Motorbetriebstemperatur).

Die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids in einem runden Rohr hängt von der Viskosität des Fluids, der Druckdifferenz und den Abmessungen des Rohrs ab. Der französische Wissenschaftler J.L. Poiseuille (1799–1869), der sich für die Physik der Blutzirkulation interessierte (und nach dem die Einheit „Poise" benannt ist) fand heraus, wie die Variablen die Strömungsgeschwindigkeit eines inkompressiblen Fluids, das eine laminare Strömung in einem zylindrischen Rohr erfährt, beeinflussen. Sein Ergebnis ist als *Poiseuille'sche Gleichung* bekannt und lautet:

Poiseuille'sche Gleichung für Volumenstrom in einem Rohr

$$Q = \frac{\pi R^4 (p_1 - p_2)}{8\eta L} \,. \qquad (13.12)$$

Dabei ist R der Innenradius des Rohrs, L seine Länge, $p_1 - p_2$ die Druckdifferenz zwischen den Enden, η ist die dynamische Viskosität und Q der Volumenstrom (das Fluidvolumen, das einen bestimmten Punkt pro Zeiteinheit durchströmt und das als SI-Einheit m^3/s hat). Die Gleichung 13.12 gilt nur für eine laminare Strömung.

Die Poiseuille'sche Gleichung besagt, dass der Volumenstrom Q direkt proportional zum „Druckgradienten" $(p_1 - p_2)/L$ und umgekehrt proportional zur Viskosität des Fluids ist. Das haben wir erwartet, überraschend ist jedoch, dass Q auch von der *vierten* Potenz des Rohrradius abhängt. Das bedeutet, dass bei demselben Druckgradienten der Volumenstrom um den Faktor 16 abnimmt, wenn der Rohrradius halbiert wird! Somit wird der Volumenstrom oder der für die Aufrechterhaltung einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit erforderliche Druck schon durch eine kleine Änderung im Rohrradius erheblich beeinflusst. Wenn wir diese Erkenntnis auf den Blutfluss anwenden – obwohl das auf Grund des Vorhandenseins von Blutkörperchen und Turbulenzen nur näherungsweise möglich ist –, wird deutlich, wie die Verkleinerung des Arterienradius durch den Aufbau von Cholesterin und/oder Arteriosklerose das Herz dazu zwingt, wesentlich mehr zu arbeiten, um den gleichen Volumenstrom beizubehalten.

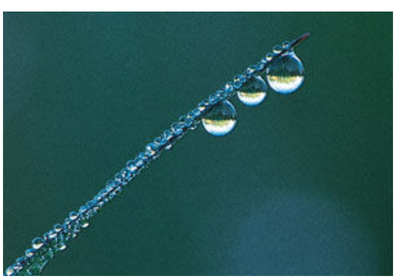


Abbildung 13.31 Kugelförmige Wassertröpfchen als Tau auf einem Grashalm.

13.12 Oberflächenspannung und Kapillarität

In diesem Kapitel haben wir bisher nur die Volumeneigenschaften von Fluiden untersucht. Die *Oberflächen* von Fluiden folgen auch physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Eine Reihe allgemeiner Beobachtungen zeigt, dass sich die Oberfläche einer Flüssigkeit wie eine gedehnte Membran unter Spannung verhält. Ein Wassertropfen am Ende eines tropfenden Wasserhahns oder an einem dünnen Zweig im Morgentau (▸ Abbildung 13.31) nimmt z. B. nahezu die Form einer Kugel an, als wäre er ein kleiner, mit Wasser gefüllter Ballon. Eine Nadel aus Stahl kann auf einer Wasseroberfläche schwimmen, obwohl sie eine größere Dichte als Wasser hat. Die Oberfläche einer Flüssigkeit verhält sich so, als ob sie sich unter Spannung befinden würde, und diese Spannung, die parallel zu der Oberfläche wirkt, entsteht durch die Anziehungskräfte zwischen den Molekülen. Es tritt eine Oberflächenspannung auf, die versucht, die Oberfläche eines Fluids möglichst klein zu halten. Die *Oberflächenspannung* γ (der griechische Buchstabe Gamma) ist definiert als die Kraft F pro Länge L, die über jede Linie in einer Oberfläche wirkt und die Oberfläche zusammenzieht:

$$\gamma = \frac{F}{L} \,. \qquad (13.13)$$

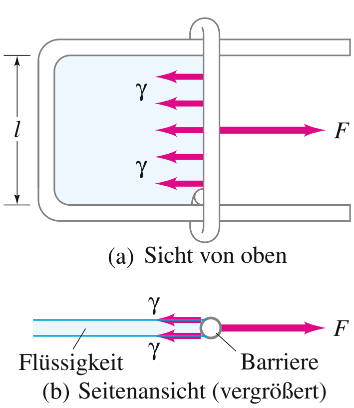


Abbildung 13.32 U-förmiges Gerät mit Barriere, um eine Flüssigkeitsschicht zu halten und so die Oberflächenspannung ($\gamma = F/2l$) zu messen.

Schauen Sie sich zum besseren Verständnis das in ▸ Abbildung 13.32 dargestellte Messgerät an, das eine dünne Flüssigkeitsschicht einschließt. Auf Grund der Oberflächenspannung ist eine Kraft F erforderlich, um an dem beweglichen Bügel zu ziehen und so die Fläche der Flüssigkeitsoberfläche zu vergrößern. Die von Rahmen und Bügel eingeschlossene Flüssigkeit ist eine dünne Schicht, die sowohl eine Ober- als auch eine Unterseite hat. Bewegen wir den Balken um Δx nach rechts, leisten wir gegen die Oberflächenspannung Arbeit: $\Delta W = F \cdot \Delta x$. Wir vergrößern die Oberfläche um $\Delta A = 2l \cdot \Delta x$ und die Energie der Oberfläche beträgt deshalb $\Delta E_{\text{Oberfläche}} = \gamma \cdot \Delta A = \gamma \cdot 2l \cdot \Delta x$. Wegen der Energieerhaltung $\Delta W = \Delta E_{\text{Oberfläche}}$

folgt $F \cdot \Delta x = \gamma \cdot 2l \cdot \Delta x$ oder $\gamma = F/2l$. Ein empfindliches Gerät dieser Art kann zum Messen der Oberflächenspannung verschiedener Flüssigkeiten verwendet werden. Es wird die Kraft F gemessen und aus obiger Gleichung die Oberflächenspannung γ bestimmt. Die Oberflächenspannung von Wasser beträgt 0,072 N/m bei 20 °C. In Tabelle 13.4 sind die Werte für andere Flüssigkeiten angegeben. Beachten Sie, dass die Temperatur einen großen Einfluss auf die Oberflächenspannung hat.

Auf Grund der Oberflächenspannung können Insekten (▸ Abbildung 13.33) auf dem Wasser gehen. Körper mit einer höheren Dichte als Wasser, wie z. B. eine Stahlnadel, können tatsächlich auf der Oberfläche schwimmen. ▸ Abbildung 13.34a zeigt, wie die Oberflächenspannung das Gewicht G eines Körpers tragen kann. In Wirklichkeit sinkt der Körper leicht in das Fluid ein, so dass G das „effektive Gewicht" des Körpers ist – sein wirkliches Gewicht abzüglich der Auftriebskraft. Wenn der Körper kugelförmig ist, wirkt die Oberflächenspannung in allen Punkten um einen horizontalen Kreis herum, dessen Radius näherungsweise r beträgt (▸ Abbildung 13.34a). Es wirkt nur die vertikale Komponente $\gamma \cos\theta$, um G auszugleichen. Wir setzen die Länge L mit dem Umfang des Kreises gleich, $L \approx 2\pi r$, so dass die auf die Oberflächenspannung zurückzuführende, nach oben gerichtete Nettokraft $F \approx (\gamma \cos\theta)L \approx 2\pi r\gamma \cos\theta$ beträgt.

Beispiel 13.15 · Abschätzung

Ein Insekt läuft auf dem Wasser

Das Ende eines Insektenbeins ist näherungsweise eine Kugel mit einem Radius von ca. $2{,}0 \cdot 10^{-5}$ m. Die Masse des Insekts von 0,0030 g wird gleichmäßig verteilt von den sechs Beinen getragen. F_A wird vernachlässigt. Schätzen Sie den Winkel θ ab (siehe ▸ Abbildung 13.34), den das Insektenbein mit der Wasseroberfläche bildet. Nehmen Sie eine Wassertemperatur von 20 °C an.

Lösung

Da sich das Insekt im Gleichgewicht befindet, ist die nach oben gerichtete Zugkraft der Oberflächenspannung gleich der auf jedes Bein wirkenden, nach unten gerichteten effektiven Gravitationskraft:

$$2\pi r\gamma \cos\theta \approx G\,.$$

Dabei ist G ein Sechstel der Gewichtskraft des Insektes (da es sechs Beine hat). Dann gilt:

$$(6{,}28)(2{,}0 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{m})(0{,}072\,\mathrm{N/m}) \cos\theta \approx \frac{1}{6}(3{,}0 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{kg})(9{,}8\,\mathrm{m/s^2})$$

$$\cos\theta \approx \frac{0{,}49}{0{,}90} = 0{,}54\,.$$

Das bedeutet, dass $\theta \approx 57°$. Beachten Sie, dass, wenn $\cos\theta$ größer als 1 wäre, dies bedeuten würde, dass die Oberflächenspannung nicht groß genug wäre, um das Gewicht zu tragen.

Tabelle 13.4

Oberflächenspannung einiger Stoffe

Stoff	Oberflächenspannung (N/m)
Quecksilber (20 °C)	0,44
Blut (37 °C)	0,058
Blutplasma (37 °C)	0,073
Ethylalkohol (20 °C)	0,023
Wasser (0 °C)	0,076
(20 °C)	0,072
(100 °C)	0,059
Benzol (20 °C)	0,029
Seifenlösung (20 °C)	≈0,025
Sauerstoff (−193 °C)	0,016

Abbildung 13.33 Ein Wasserläufer.

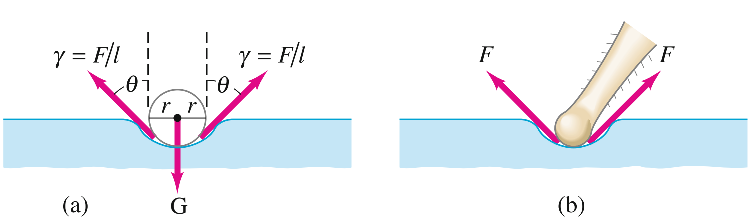


Abbildung 13.34 Oberflächenspannung wirkt auf (a) eine Kugel und (b) das Bein eines Insekts. Beispiel 13.15.

PEARSON ALWAYS LEARNING

Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!
Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: info@pearson.de

Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.**

Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

http://ebooks.pearson.de

ALWAYS LEARNING PEARSON