KPK

Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I

Neuauflage 2021

Gesamtband

DER KARLSRUHER PHYSIKKURS

Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe I

Herrmann

Der Karlsruher Physikkurs

Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe I
Gesamtband
Auflage Juli 2021

Bearbeitet von Karen Haas, Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Matthias Laukenmann, Dr. Lorenzo Mingirulli, Dr. Petra Morawietz, Dr. Peter Schmälzle

Herstellung: Dr. Heiner Schwarze

INHALTSVERZEICHNIS

5 Impuls und Energie

6 Der Impuls als Vektor

7 Drehmoment und Schwerpunkt

8 Drehimpuls und Drehimpulsströme

9 Druck- und Zugspannungen

10 Entropie und Energie

11 Entropie und Energie

12 Phasenübergänge

13 Gase

14 Licht

15 Daten und Datenträger

16 Elektrizität und elektrische Ströme

17 Elektrizität und Energie

18 Das magnetische Feld

19 Elektrostatik

20 Datentechnik

21 Das Licht

22 Die optische Abbildung

23 Farben

24 Stoffumsatz und chemisches Potenzial

25 Stoffmenge und Energie

26 Wärmebilanz von Reaktionen

27 Relativistische Physik

28 Wellen

29 Photonen

30 Atome

31 Feste Stoffe

32 Atomkerne

33 Anhang

1 ENERGIE UND ENERGIETRÄGER

1.1 Die Energie

Autos brauchen Benzin, Diesellokomotiven brauchen Dieselöl, Elektrolokomotiven brauchen Elektrizität. Jedes Fahrzeug braucht einen Treibstoff — aber nicht nur jedes Fahrzeug. Auch wenn man zu Fuß geht oder mit dem Rad fährt, wird Treibstoff gebraucht: Der laufende oder Rad fahrende Mensch verbraucht Nahrung. Alle diese „Treibstoffe“ haben etwas gemeinsam: Mit ihnen bekommt das Fahrzeug, beziehungsweise der Mensch, Energie. Die Energie ist das, was man für jeden Transport braucht.

Energie hat etwas mit Anstrengung zu tun. Wenn wir einen Wagen ziehen, strengen wir uns an. Wir brauchen zum Ziehen des Wagens Energie. Während des Ziehens schicken wir diese Energie in den Wagen.

> Um etwas zu bewegen, braucht man Energie.

Aber nicht nur zum Bewegen braucht man Energie. Auch viele andere Vorgänge laufen nur dann ab, wenn ständig Energie zugeführt wird.

Zum Heizen braucht man immer eine Art Brennstoff: Holz, Kohle, Erdgas, Heizöl oder Elektrizität. Wieder ist das, worauf es ankommt, die Energie, die mit dem „Brennstoff“ mitgeliefert wird.

> Zum Heizen braucht man Energie.

Wir nennen die Treibstoffe oder Brennstoffe, mit denen die Energie in einen Motor oder in einen Ofen gelangt, Energieträger. Holz, Kohle, Benzin, Dieselöl, Erdgas und Elektrizität sind Energieträger.

Wenn man etwas bewegen will, oder wenn man heizen will, kommt es auf die Energie an. Welchen Träger man benutzt, ist oft gar nicht wichtig. Kann man dann aber nicht einfach Energie ohne einen Träger einsetzen? Vielleicht wäre das bequemer. Leider geht das nicht, denn Energie ohne Träger gibt es nicht.

> Treibstoffe, Brennstoffe, Nahrungsmittel und Elektrizität sind Energieträger. Energie ohne Träger gibt es nicht.

Die Energie ist eine physikalische Größe. Was heißt das? Genauso wie einer Länge, einer Zeitdauer oder einer Temperatur kann man ihr eine Zahl zuordnen, und genauso wie Länge, Zeitdauer und Temperatur hat auch die Energie eine Maßeinheit. Die Maßeinheit der Energie ist das Joule, abgekürzt J. Sehr große Energiemengen misst man in Kilojoule (kJ) oder Megajoule (MJ):

1 kJ = 1000 J
1 MJ = 1000 kJ

Wie für andere physikalische Größen auch, so benutzt man für die Energie ein Symbol. Wie die Länge durch den Buchstaben l und die Zeit durch t abgekürzt werden, so schreibt man für die Energie kurz E. Wenn das Benzin im Tank eines Autos eine Energiemenge von 800 Megajoule enthält, so kann man abgekürzt schreiben:

E = 800 MJ.

Brennstoffe	Energieinhalt
Steinkohle	30 000 kJ pro kg
Briketts	20 000 kJ pro kg
frisches Holz	8 000 kJ pro kg
Propangas	46 000 kJ pro kg
Heizöl	42 000 kJ pro kg
Benzin	43 000 kJ pro kg

Tab. 1.1 Energieinhalt einiger Brennstoffe

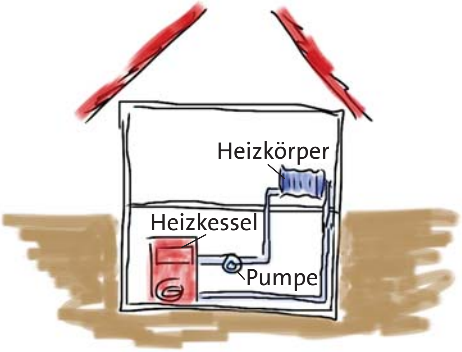


Abb. 1.1 Die Energie geht mit dem Energieträger „warmes Wasser“ vom Heizkessel zum Heizkörper.

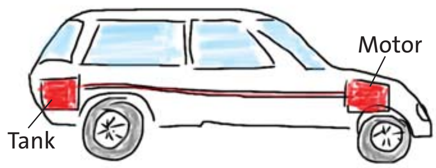


Abb. 1.2 Die Energie gelangt mit dem Energieträger Benzin vom Tank zum Motor.

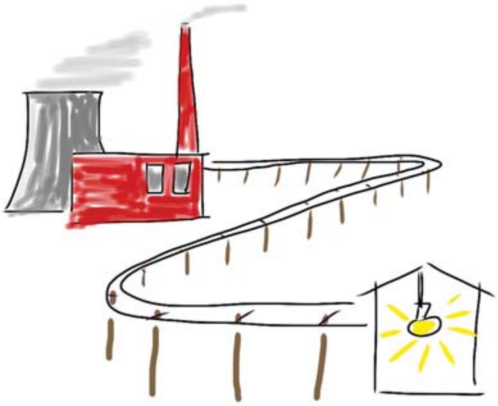


Abb. 1.3 Die Energie kommt mit dem Energieträger Elektrizität vom Kraftwerk zur Lampe.

Verwechsle nicht das Symbol *E* für die Energie mit dem Symbol J für ihre Maßeinheit.

Von einem Brennstoff kann man sagen, ein kg davon enthalte so und so viel Joule, Tab. 1.1. Der Energieinhalt von Nahrungsmitteln ist oft auf die Packung aufgedruckt. Eine volle Flachbatterie enthält etwa 10 kJ, eine geladene Autobatterie ungefähr 2 000 kJ – etwa so viel wie eine Tafel Schokolade. Eine Güterzuglokomotive braucht pro Stunde 10 000 MJ, eine Armbanduhr mit Digitalanzeige 0,1 J.

Für die Messung von Energiemengen benutzt man je nach Energieträger verschiedene Verfahren. Um den Energieverbrauch eines Autos zu bestimmen, braucht man nur die Menge des verbrauchten Benzins (in kg) zu messen und mit dem entsprechenden Wert in Tab. 1.1 zu multiplizieren. Die Energie, die elektrisch ins Haus kommt, wird mit dem sogenannten Stromzähler gemessen.

1.2 Energiequellen und Energieempfänger

Abb. 1.1 zeigt einen Ausschnitt aus einer Zentralheizung. Im Heizkessel, der gewöhnlich im Keller steht, wird Wasser erwärmt. Das warme Wasser wird durch Rohre zu den einzelnen Heizkörpern gepumpt. In Abb. 1.1 ist nur ein einziger Heizkörper dargestellt. Wir nennen den Heizkessel die Energiequelle, den Heizkörper den Energieempfänger. Der Automotor in Abb. 1.2 bekommt seine Energie mit dem Energieträger Benzin aus dem Benzintank. Hier ist der Benzintank die Energiequelle und der Motor der Energieempfänger.

Die Energie für die Glühlampe in Abb. 1.3 kommt mit dem Träger Elektrizität von einem Kraftwerk. Das Kraftwerk ist die Energiequelle, die Lampe der Energieempfänger.

Immer wenn irgendwo Energie fließt (selbstverständlich zusammen mit einem Träger), kann man angeben, welches die Quelle und welches der Empfänger ist. Verfolgt man den Weg des Energieträgers rückwärts bis zu seinem Anfang, so kommt man zur Energiequelle. Verfolgt man ihn vorwärts bis zu seinem Ende, so kommt man zum Energieempfänger.

Die Vorgänge in Abb. 1.1 bis Abb. 1.3 haben also etwas gemeinsam: In jedem Fall fließt Energie, zusammen mit ihrem Träger, von einer Quelle zu einem Empfänger. Wenn es uns auf die Einzelheiten nicht ankommt, wenn wir das Gemeinsame der dargestellten Geräte und Anlagen zum Ausdruck bringen wollen, ist es zweckmäßig, die Vorgänge symbolisch darzustellen, wie es die Abb. 1.4 bis Abb. 1.6 zeigen. Energiequelle und Energieempfänger werden durch je einen Kasten dargestellt. Die Kästen werden verbunden durch einen dicken Pfeil für die Energie und einen dünnen für den Energieträger. Wir nennen diese symbolischen Abbildungen Energieflussbilder.

Wir wollen die Abb. 1.4 bis Abb. 1.6 noch in einem Punkt vervollständigen. Der Energieträger gelangt mit der Energie von der Quelle zum Empfänger. Nachdem er seine Energie abgeladen hat, wird er den Empfänger im Allgemeinen wieder verlassen. Dies ist in den Abb. 1.7 bis Abb. 1.9 dargestellt. Du siehst, dass mit dem Energieträger, nachdem er den Empfänger verlässt, Verschiedenes passieren kann.

Im Fall der Zentralheizung wird er zur Quelle zurückgebracht. Das Wasser fließt durch die Hinleitung zum Heizkörper. Dort gibt es Energie an das zu heizende Zimmer ab und wird dabei kälter. Es fließt dann durch die Rückleitung zurück zum Heizkessel, um dort erneut erhitzt zu werden. Das Wasser wird also wiederverwendet. Es ist ähnlich wie bei einem Getränk, das in Mehrwegflaschen abgefüllt wird. Die Flaschen gehen, nachdem sie leer getrunken worden sind, zurück zur Abfüllfabrik. Wir wollen das Wasser bei der Zentralheizung deshalb auch einen Mehrwegflaschenenergieträger nennen.

Anders ist es bei dem Energietransport in Abb. 1.8. Das Benzin verbrennt im Motor und verwandelt sich in Abgase. Die Abgase werden natürlich nicht zum Benzintank zurückgeleitet. Sie gehen zum Auspuff hinaus, sie werden „weggeworfen“, ähnlich wie Einwegflaschen für Getränke. Wir nennen das Benzin einen Einwegflaschenenergieträger.

Man kann die beiden Arten von Energieträgern leicht voneinander unterscheiden. Da Mehrwegflaschenenergieträger in einem geschlossenen Stromkreis fließen, sind Energiequelle und

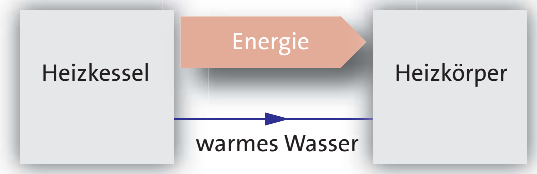


Abb. 1.4 Energieflussbild zu Abb. 1.1

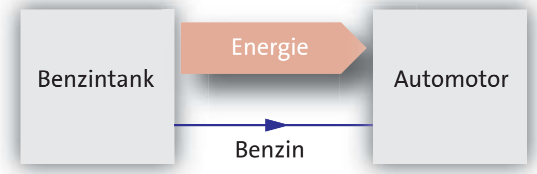


Abb. 1.5 Energieflussbild zu Abb. 1.2

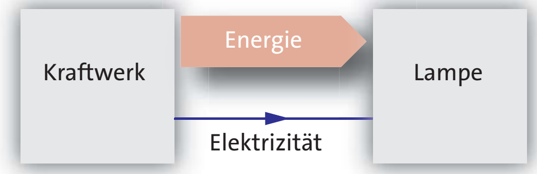


Abb. 1.6 Energieflussbild zu Abb. 1.3

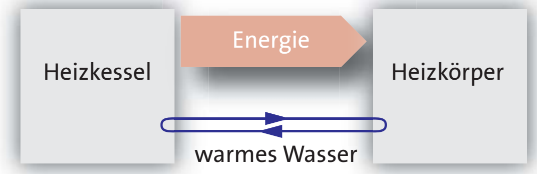


Abb. 1.7 Vervollständigtes Energieflussbild zu Abb. 1.1

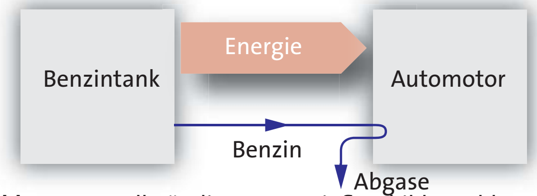


Abb. 1.8 Vervollständigtes Energieflussbild zu Abb. 1.2

-empfänger immer durch zwei Leitungen miteinander verbunden. Bei Einwegflaschenenergieträgern dagegen läuft nur eine Leitung von der Quelle zum Empfänger.

Die Elektrizität muss ein Mehrwegflaschenenergieträger sein, denn ein elektrisches Kabel enthält zwei Drähte, Abb. 1.9.

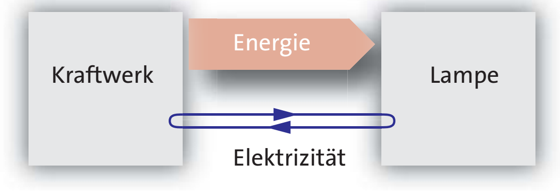


Abb. 1.9 Vervollständigtes Energieflussbild zu Abb. 1.3

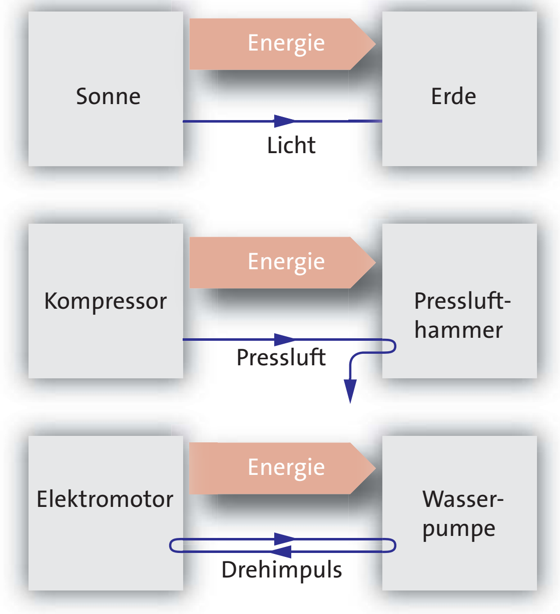


Abb. 1.10 Einige Energieflussbilder

Manchmal ist es nicht leicht zu entscheiden, ob man es mit einem Einweg- oder mit einem Mehrwegflaschenenergieträger zu tun hat.

Ein Energieträger, den wir noch nicht erwähnt haben, ist das Licht. Es trägt zum Beispiel die Energie von der Sonne zur Erde, Abb. 1.10. Einen Ausgang für Licht hat der Energieempfänger nicht. Licht ist also ein Einwegflaschenenergieträger. Genaueres hierzu später.

Genauso wie das warme Wasser, das in der Zentralheizung die Energie vom Heizkessel zu den Heizkörpern befördert, transportiert auch heiße Luft Energie. Man nutzt diese Möglichkeit bei der Autoheizung.

Ein Presslufthammer muss an einen Kompressor angeschlossen werden, damit er arbeiten kann. Er bekommt seine Energie vom Kompressor. Energieträger ist hier die Pressluft. Sie ist ein Einwegflaschenenergieträger.

Auch Flüssigkeiten, die unter Druck stehen, werden als Energieträger benutzt: Eine Wasserturbine bekommt ihre Energie mit Wasser, das unter hohem Druck steht. Die Schaufel und die Gelenke eines Baggers bekommen ihre Energie mit dem unter hohem Druck stehenden Hydrauliköl.

Luft und Wasser können aber auch als Energieträger dienen, ohne warm zu sein und ohne unter Druck zu stehen. Es genügt schon, dass sie sich schnell bewegen. Ein Windrad z. B. bekommt Energie mit dem Energieträger „bewegte Luft".

Wenn ein Motor irgendeine Maschine, z. B. eine Wasserpumpe, über eine sich drehende Welle antreibt, fließt Energie durch die Welle vom Motor zur Maschine. Den Träger, mit dem die Energie durch die Welle gelangt, nennt man Drehimpuls. Für den Drehimpuls gibt es eine Rückleitung: Er fließt von der angetriebenen Maschine zurück zum Motor über das Fundament, auf das Maschine und Motor montiert sind. Er ist also ein Mehrwegflaschenenergieträger. Auch hierzu erfährst du später mehr.

In Tab. 1.2 sind alle diese Energieträger noch einmal aufgelistet.

Energieträger
Treibstoffe, Brennstoffe, Nahrungsmittel
Elektrizität
Licht
Drehimpuls
warmes Wasser, warme Luft
Wasser und Luft unter Druck
bewegtes Wasser, bewegte Luft

Tab. 1.2 Energieträger

Aufgaben

1. Nenne drei verschiedene Energieempfänger, die Energie mit dem Energieträger Elektrizität bekommen.
2. Nenne drei verschiedene Energiequellen, die Energie mit dem Energieträger Drehimpuls abgeben.
3. Nenne drei Mehrwegflaschenenergieträger und drei Einwegflaschenenergieträger.

1.3 Energieumlader

Einige der Energiequellen, die wir aufgezählt haben, sind so beschaffen, dass sie nicht leer werden: Sie bekommen ständig neue Energie nachgeliefert – allerdings mit einem anderen Träger. Sie sind also Quelle für Energie mit einem Träger A und Empfänger für Energie mit einem anderen Träger B. So bekommt der Heizkessel der Zentralheizung Energie mit dem Träger „Heizöl", und er gibt sie ab mit dem Träger „warmes Wasser". Wir sagen: Im Heizkessel wird Energie vom Träger „Heizöl" auf den Träger „warmes Wasser" umgeladen, der Heizkessel ist ein Energieumlader.

So wird im Automotor Energie von Benzin auf Drehimpuls, und in der Glühlampe von Elektrizität auf Licht umgeladen. In Abb. 1.11 sind einige Energieumlader symbolisch dargestellt, und Tab. 1.3 enthält eine längere Liste von Energieumladern mit den jeweiligen Trägern an Ein- und Ausgang. Man findet zu jedem Gerät, das Energie von einem Träger A auf einen Träger B umlädt, ein anderes Gerät, das gerade das Gegenteil tut, das also Energie von B auf A umlädt. So wird die Energie im Elektromotor vom Träger Elektrizität auf den Träger Drehimpuls umgeladen, im Generator geht sie vom Drehimpuls auf die Elektrizität über. Genauso gehören Lampe und Solarzelle zusammen, oder Wasserturbine und Wasserpumpe.

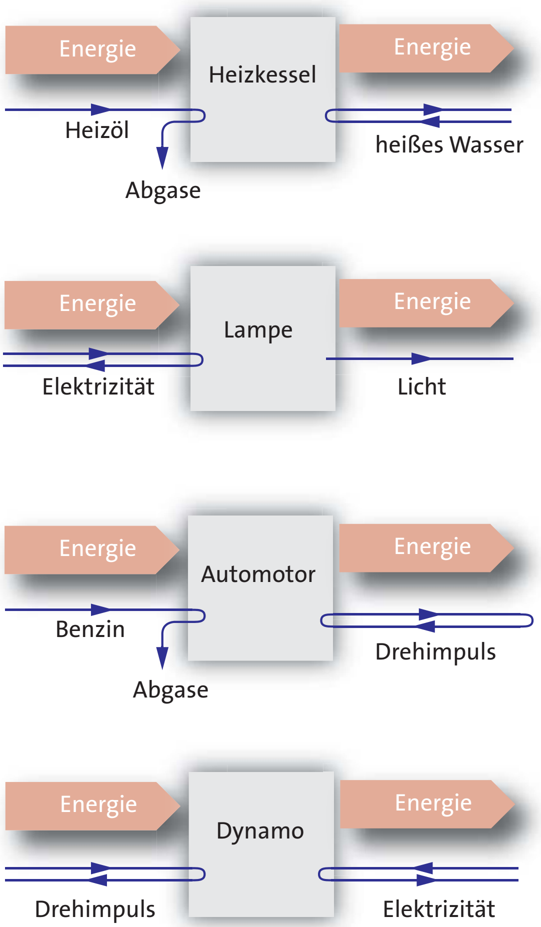


Abb. 1.11 Energieumlader

Energieumlader	Energieträger Eingang	Energieträger Ausgang
Elektromotor	Elektrizität	Drehimpuls
Lampe	"	Licht
Elektroofen	"	warme Luft
Heißwassergerät	"	warmes Wasser
Elektropumpe	"	Druckwasser
Ventilator	"	bewegte Luft
Dieselkompressor	Brennstoff	Pressluft
Kohlekraftwerk	"	Elektrizität
Benzinmotor	"	Drehimpuls
Petroleumlampe	"	Licht
Ölofen	"	warme Luft
Heizkessel	"	warmes Wasser
Solarzelle	Licht	Elektrizität
Lichtmühle	"	Drehimpuls
Sonnenkollektor	"	warmes Wasser
Wald	"	Holz
Kompressor	Drehimpuls	Pressluft
Wasserpumpe	"	Druckwasser
Dynamo, Generator	"	Elektrizität
Windrad	"	Drehimpuls
Wasserturbine	Druckwasser	Drehimpuls
Windrad	bewegte Luft	Drehimpuls

Tab. 1.3 Energieumlader mit zugehörigen Trägern an Ein- und Ausgang

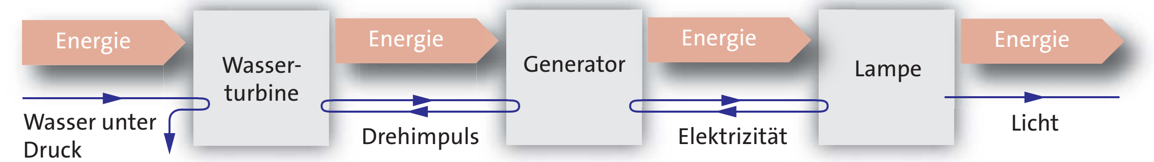


Abb. 1.12 Energietransport, bei dem die Energie dreimal umgeladen wird

Oft wird Energie mehrere Male nacheinander von einem Träger auf einen anderen umgeladen. Abb. 1.12 zeigt eine Lampe, die von einem Wasserkraftwerk versorgt wird.

Hängt man zwei Energieumlader aneinander, so muss der Energieträger am Ausgang des ersten mit dem am Eingang des zweiten übereinstimmen. Die Regel für das Aneinanderhängen von Energieumladern ist dieselbe wie die Regel des Dominospiels.

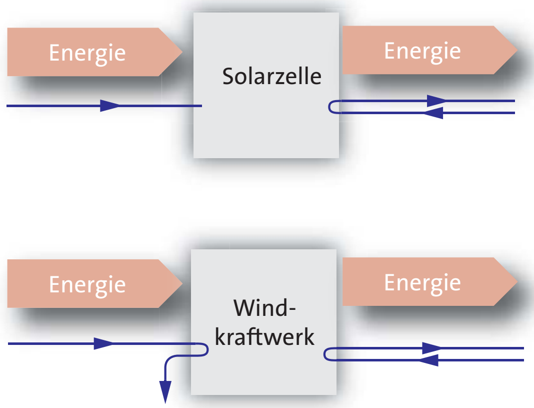


Abb. 1.13 Welches sind die Energieträger an Ein- und Ausgang?

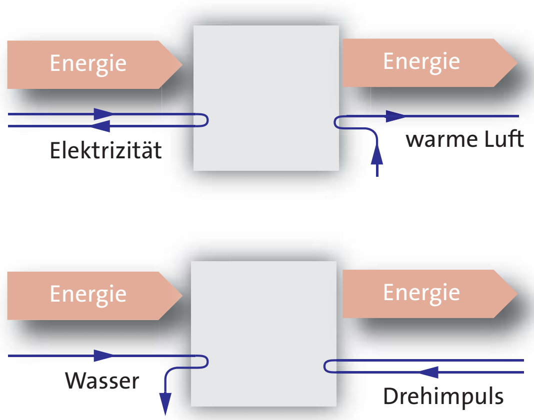


Abb. 1.14 Um welche Energieumlader handelt es sich?

Aufgaben

1. In Abb. 1.13 fehlen die Namen der Energieträger an den Ein- und Ausgängen der beiden Umlader. Vervollständige die Abbildung.
2. Trage in Abb. 1.14 die Namen der Energieumlader ein.
3. Zeichne eine Umladerkette, an der mindestens drei verschiedene Energieumlader beteiligt sind.
4. Manche Geräte kann man auf unterschiedliche Weise durch Umladersymbole darstellen. So kann man einen Staubsauger als einen einzigen Umlader auffassen und ihn durch ein einziges Umladersymbol darstellen, oder man kann ihn durch zwei aneinander gehängte Symbole darstellen. Gib beide Darstellungsmöglichkeiten an.
5. Um eine Lampe mithilfe eines Windrades zu betreiben, braucht man ein zusätzliches Gerät. Welches? Zeichne das Flussdiagramm.
6. Gerät 1 lädt Energie von Träger A auf Träger B. Gerät 2 macht das Umgekehrte, es lädt Energie von Träger B auf Träger A. Gib drei Paare von Energieumladern an, die auf diese Weise zusammenhängen.

1.4 Die Energiestromstärke

Um den Energieverbrauch eines Geräts zu beurteilen, muss man danach fragen, wie viel Energie in das Gerät während einer bestimmten, vorgegebenen Zeitdauer fließt. (Die Energie muss natürlich auch wieder herauskommen.) Ein Gerät, in das pro Sekunde 1000 J fließen, „verbraucht“ mehr Energie als ein Gerät, in das pro Sekunde 500 J fließen.

Stell dir vor, du weißt von einem Gerät, dass es in 50 Sekunden 25 000 Joules verbraucht. Wie bekommt man daraus den Energieverbrauch in einer Sekunde? Indem man die Gesamtenergie von

25 000 J durch 50 s dividiert: Das Gerät braucht also

25 000 J/50 s = 500 J/s.

Die Energiemenge dividiert durch die Zeitdauer nennt man die Energiestromstärke oder, kurz, den Energiestrom.

$$\text{Energiestromstärke} = \frac{\text{Energie}}{\text{Zeit}}$$

Mit den Abkürzungen E für die Energie, t für die Zeitdauer und P für die Energiestromstärke ergibt sich

$$P = \frac{E}{t}.$$

Neben dem Wort „Energiestrom" benutzt man zur Bezeichnung von P das Wort „Leistung". Die Maßeinheit des Energiestroms ist Joule/ Sekunde. Ein Joule/Sekunde nennt man ein Watt. Abgekürzt:

W = J/s.

In eine typische Lampe fließt ein Energiestrom von 20 Watt (mit dem Träger Elektrizität). Es ist

P = 15 W.

Beim Auto fließen etwa 50 kW vom Motor zu den Rädern (mit dem Träger Drehimpuls). Ein großes Kraftwerk liefert einen elektrizitätsgetragenen Energiestrom von 1 000 MW. Der Anteil des Energiestroms von der Sonne, der auf die Erde trifft, beträgt $1{,}7 \cdot 10^{11}$ MW; das ist so viel, wie hundertsiebzig Millionen große Kraftwerke abgeben würden. Dadurch, dass der Mensch isst, nimmt er Energie auf; durch den Menschen fließt daher ein Energiestrom. Er beträgt im Durchschnitt etwa 100 W.

Es gibt Energiequellen, die leer werden können, z. B. die Autobatterie, die Monozelle und der Benzintank. In diesen Geräten kann man Energie aufbewahren. Wir nennen sie Energiespeicher. Weitere Energiespeicher sind Aufziehmotor, Schwungrad, Pumpspeicherwerk, Heizöltank, Leuchtfarbe und Sonne.

Aufgabe

1. Ein Zweistufen-Föhn trägt die Aufschrift:
   Stufe 1: 500 W
   Stufe 2: 1000 W.
   Was bedeutet diese Angabe?

2 STRÖMUNGEN VON FLÜSSIGKEITEN UND GASEN

Die meisten Bagger, manche Kräne und viele andere Maschinen werden hydraulisch angetrieben. Man erkennt dies an den Rohren und Schläuchen, die von einer zentralen Pumpe aus zu den verschiedenen Stellen laufen, an denen etwas bewegt werden soll.

Daneben gibt es Maschinen und Geräte, die pneumatisch angetrieben werden, z. B. der Presslufthammer. Der pneumatische Antrieb funktioniert ähnlich wie der hydraulische, nur verwendet man hier Pressluft als Energieträger.

Wir werden in diesem Kapitel Flüssigkeits- und Gasströmungen, wie sie in diesen Maschinen angewendet werden, untersuchen. Dabei werden wir einige einfache Regeln entdecken. Es lohnt sich, dass du dir diese Regeln merkst. Sie gelten nämlich nicht nur hier, also nicht nur für Luft- und Wasserströme. Sie gelten, wenn man sie nur wenig abändert, auch für ganz andere Ströme: für elektrische Ströme, Wärmeströme und für die sogenannten Impulsströme.

Druckwerte	
Wasserleitung	2 – 5 bar
Autoreifen	4 bar
Wasserdampf im Kessel eine Kraftwerks	150 bar
Hydraulikflüssigkeit eines Baggers	150 bar
an der tiefsten Stelle des Ozeans	1000 bar
in einer vollen Sauerstoffflasche	150 bar
in einer vollen Propangasflasche	8 bar
um aus Graphit Diamanten künstlich herzustellen, setzt man das Graphit unter einen Druck von mindesten	15 000 bar
im Innern der Sonne	221 000 000 000 bar

Tab. 2.1 Typische Druckwerte

Abb. 2.1 Das Wasser in der Wasserleitung steht unter Druck.

2.1 Der Druck

Dreht man den Wasserhahn weit auf, so schießt das Wasser in starkem Strahl heraus, Abb. 2.1. Das kommt daher, dass das Wasser in der Leitung einen hohen Druck hat. Öffnet man das Ventil eines aufgepumpten Fahrrad- oder Autoreifens, so zischt die Luft heraus. Das liegt daran, dass die Luft im Reifen einen hohen Druck hat.

Genauso wie Gewicht, Länge und Energie ist der Druck eine physikalische Größe. Die Maßeinheit des Drucks ist das Bar. Druckmessgeräte heißen Manometer, Abb. 2.2. In Tab. 2.1 sind einige Druckwerte aufgeführt.

Außer dem Bar benutzt man noch eine andere Einheit für den Druck: das Pascal, abgekürzt Pa.

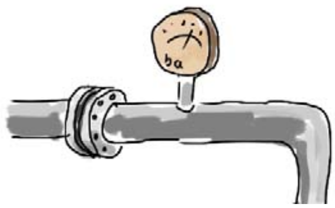


Abb. 2.2 Drücke misst man mit dem Manometer.

Es gilt der Zusammenhang:

1 bar = 100 000 Pa.

Das Bar ist zwar gebräuchlicher und handlicher als das Pascal. Für den Physiker hat aber die kleinere Einheit Pascal einen Vorteil: Der Zusammenhang zwischen dem Druck und anderen physikalischen Größen wird einfacher.

2.2 Luftdruck, Überdruck, Vakuum

Die uns umgebende Luft hat einen Druck von fast genau 1 bar. Man nennt diesen Druck den Normaldruck. Der Druck der Luft kommt dadurch zustande, dass die weiter oben liegende Luft wegen ihres Gewichts auf die tiefer liegende drückt.

Daher nimmt der Luftdruck nach oben hin ab, und zwar zuerst schneller und dann immer langsamer. Abb. 2.3 zeigt den Luftdruck als Funktion der Höhe über dem Meeresspiegel. In 4000 m Höhe, also im Hochgebirge, beträgt der Luftdruck noch etwa 0,6 bar.

Der Luftdruck ist nicht zu jedem Zeitpunkt derselbe. Sein Wert hängt mit dem Wetter zusammen. Das Gerät, mit dem man den Druck der uns umgebenden Luft misst, hat einen besonderen Namen: Barometer.

Dass wir den Luftdruck nicht spüren, liegt daran, dass die Luft von allen Seiten auf unseren Körper drückt. Sogar in Hohlräumen im Körper wie in der Lunge oder im Ohr befindet sich Luft, die denselben Druck hat wie die Außenluft. Die meisten Manometer zeigen nicht den absoluten, d. h. den wirklichen Druck an, sondern den sogenannten Überdruck. So zeigt das Manometer, mit dem man den Autoreifendruck prüft, den Druckunterschied zwischen der Luft im Innern des Reifens und der Außenluft an.

Man kann in einem Behälter Luft haben, deren Druck geringer ist als der Außendruck. Man sagt dann, in dem Behälter herrsche Unterdruck.

Befindet sich gar keine Luft und kein anderer Stoff mehr im Behälter, so beträgt der Druck 0 bar. Man nennt einen solchen materiefreien Raum Vakuum.

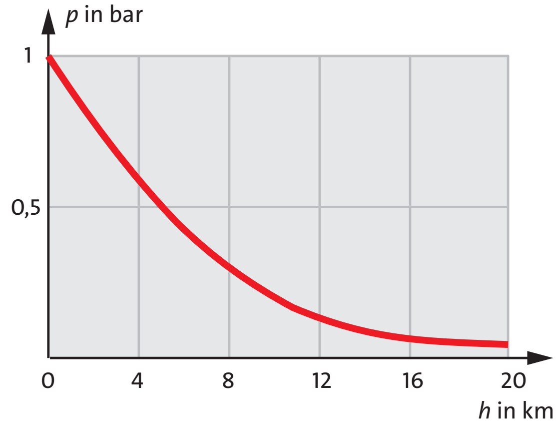


Abb. 2.3 Luftdruck als Funktion der Höhe über dem Meeresspiegel

Aufgaben

1. Falls ihr zu Hause ein Barometer habt: Lies 7 Tage lang morgens und abends den Luftdruck ab. Trage den Druck über der Zeit auf.
2. Ein Autofahrer kontrolliert den Druck der Luft im Ersatzreifen. Das Manometer zeigt 0 bar Überdruck an. Wie groß ist der tatsächliche Druck im Ersatzreifen?

2.3 Der Druckunterschied als Antrieb für einen Gas- oder Flüssigkeitsstrom

Öffnet man das Ventil eines aufgepumpten Autoreifens, so strömt Luft aus. Sie strömt aus dem Reifen, in dem ein hoher Druck herrscht, nach außen, wo der Druck niedriger ist. Öffnet man eine Packung „vakuumverpackter“ Erdnüsse, so zischt es. Es strömt Luft in die Packung hinein, in der ein geringerer Druck herrscht als außen. In beiden Fällen strömt die Luft von einer Stelle höheren Drucks zu einer Stelle niedrigeren Drucks. Wir schließen an den Wasserhahn einen langen, sehr dünnen Schlauch an und öffnen den Wasserhahn. Es strömt Wasser aus. Im Wasserleitungsnetz steht das Wasser unter hohem Druck. Am Ende des Schlauches hat es einen niedrigen Druck, nämlich Normaldruck. Auch das Wasser fließt also von selbst von Stellen hohen zu Stellen niedrigen Drucks. Das Entsprechende gilt für andere Gase und Flüssigkeiten.

Flüssigkeiten und Gase strömen von selbst von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren Drucks. Der Druckunterschied ist ein Antrieb für Flüssigkeits- und Gasströme.

Ein Autoreifen wird aufgepumpt und über einen Schlauch mit einem anderen, nicht aufgepumpten Reifen verbunden, Abb. 2.4. Man hört die Luft durch den Schlauch strömen, aber nach einer Weile hört das Strömen auf. Wir entfernen den Schlauch und messen den Druck in beiden Reifen. Ergebnis: Der Druck ist in beiden Reifen derselbe. In dem aufgepumpten Reifen, in dem der Druck vorher den größeren Wert hatte, hat der Druck abgenommen, im anderen Reifen hat er zugenommen. Was ist passiert? Die Luft ist von dem Reifen mit dem höheren Druck in den mit dem niedrigeren Druck geströmt, und zwar so lange, bis der Druckunterschied, d. h. der Antrieb für den Strom, verschwunden ist. Den Endzustand, in dem die Luft nicht mehr strömt (obwohl die Verbindung noch vorhanden ist), nennt man den Zustand des Druckgleichgewichts.

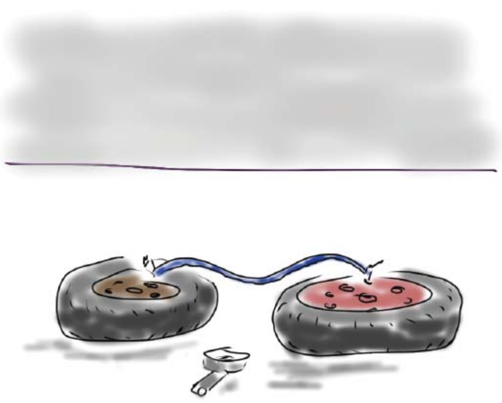


Abb. 2.4 Die Luft strömt vom Reifen mit dem höheren Druck in den Reifen mit dem niedrigeren Druck.

Beachte, dass die Luftmenge im Endzustand in den beiden Reifen nicht dieselbe ist: Im größeren Reifen befindet sich mehr Luft.

Man sieht hier auch deutlich, dass nicht der Druck, sondern der Druckunterschied der Antrieb für den Luftstrom ist: Wenn Druckgleichgewicht herrscht, strömt die Luft nicht mehr, auch wenn der Druck selbst noch sehr hoch ist.

Aufgabe

1. Der Luftdruck in einem großen Reifen beträgt 1 bar und in einem kleinen 4 bar. Die beiden Reifen werden mithilfe eines Schlauchs miteinander verbunden, sodass die Luft vom einen in den anderen strömen kann.
(a) Was passiert?
(b) Liegt der sich einstellende Druck näher bei 1 bar oder näher bei 4 bar?
(c) In welchem Reifen ist am Ende mehr Luft?

2.4 Pumpen

Oft möchte man eine Flüssigkeit oder ein Gas von einer Stelle niedrigen Drucks zu einer Stelle hohen Drucks befördern. Man erreicht das mit einer Pumpe. Am Ausgang der Wasserpumpe von Abb. 2.5 hat das Wasser einen höheren Druck als am Eingang.

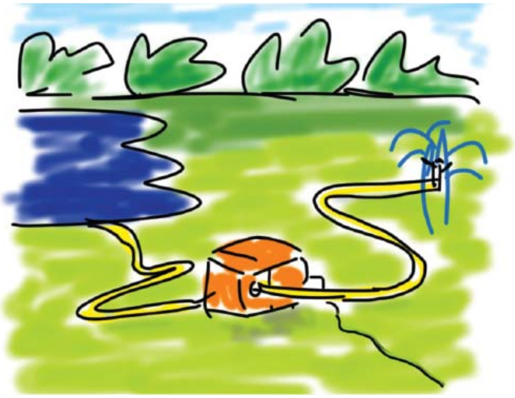


Abb. 2.5 Das Wasser hat am Ausgang der Pumpe einen höheren Druck als am Eingang.

Es gibt verschiedene Arten von Pumpen. Abb. 2.6 zeigt eine Kreiselpumpe. Das ankommende Was-

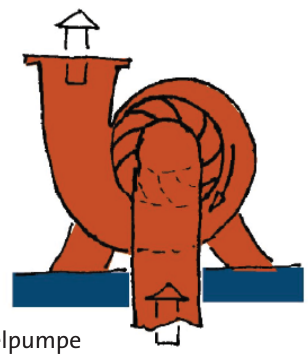


Abb. 2.6 Kreiselpumpe

ser gelangt in die Mitte zwischen die Flügel des Flügelrades. Da sich das Rad dreht, muss sich das Wasser mitdrehen. Dabei wird es nach außen geschleudert (wie die Passagiere in einem Auto, das um die Kurve fährt) und zur Austrittsöffnung hinausgedrückt. Kreiselpumpen werden zum Beispiel verwendet, um das Wasser aus der Waschmaschine zu pumpen.

Die Funktionsweise von Zahnradpumpen geht aus Abb. 2.7 hervor. Zahnradpumpen sind geeignet, sehr große Druckunterschiede zu erzeugen.

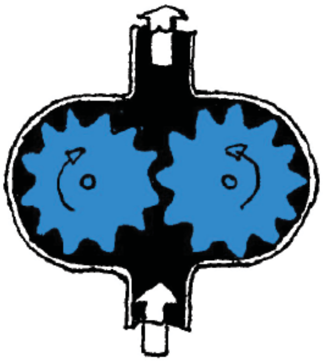


Abb. 2.7 Zahnradpumpe

Eine etwas raffiniertere Version dieses Pumpentyps wird in Baggern als Hydraulikpumpe verwendet. Pumpen, mit denen man Gase auf hohe Drucke bringt, nennt man auch Kompressoren.

> Pumpen befördern Gase und Flüssigkeiten von Stellen niedrigeren zu Stellen höheren Drucks.

2.5 Die Stromstärke

Es kommt vor, dass man zwei Ströme, z. B. zwei Wasserströme, miteinander vergleichen will. So kann man fragen: „Welcher der beiden Ströme ist breiter?", oder „Welcher der beiden Ströme fließt schneller?" Oft interessiert man sich aber weder für die Breite noch für die Geschwindigkeit, sondern für die Stromstärke. Die Stromstärke eines Wasserstroms ist die Wassermenge, die in einer bestimmten Zeitspanne an einer bestimmten Stelle vorbeifließt, dividiert durch diese Zeitspanne:

$$\text{Wasserstromstärke} = \frac{\text{Wassermenge}}{\text{Zeit}}$$

Man kann die Wassermenge in Liter oder in Kilogramm messen. Als Maßeinheit für die Stromstärke ergibt sich dann l/s bzw. kg/s. Im Rhein bei Karlsruhe fließen in jeder Sekunde etwa 1 500 000 Liter unter der Rheinbrücke durch. Die Stromstärke des Rheins beträgt also an dieser Stelle 1 500 000 l/s.

Wir hatten im vorigen Kapitel schon die Energiestromstärke kennen gelernt. Sie gibt an, wie viel Joules pro Sekunde an einer bestimmten Stelle vorbeifließen.

Man verwechselt leicht die Stärke eines Stroms mit seiner Geschwindigkeit. Der Fluss in Abb. 2.8 hat überall dieselbe Stromstärke. Die Geschwindigkeit ist aber an der engen Stelle größer als an der weiten.

In Abb. 2.9 fließt von links, durch Leitung A, ein Wasserstrom von 1 l/s zur Rohrkreuzung hin. Durch Leitung B fließen 0,5 l/s, und durch Leitung C 0,2 l/s von der Kreuzung weg. Welche Stromstärke hat das Wasser in Leitung D, und in welche Richtung fließt es?

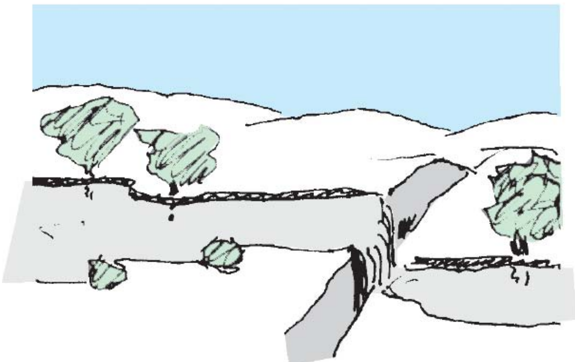


Abb. 2.8 Die Stromstärke ist an jeder Stelle des Flusses dieselbe.

Da in der Kreuzung Wasser weder verschwindet noch erzeugt wird, muss die Wassermenge, die insgesamt in jeder Sekunde zur Kreuzung hinfließt, dieselbe sein wie die insgesamt in jeder Sekunde von der Kreuzung wegfließende. Damit in unserem Fall die Bilanz stimmt, müssen durch Leitung D 0,3 l/s wegfließen:

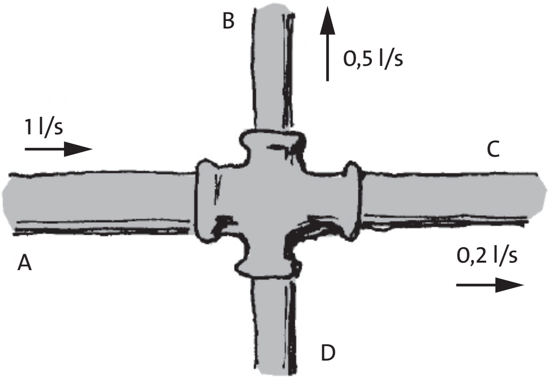


Abb. 2.9 Durch Leitung A fließt in jeder Sekunde genauso viel Wasser zur Rohrkreuzung hin, wie durch die Leitungen B, C und D von der Kreuzung weg.

Zur Kreuzung hin fließt

1 l/s,

von der Kreuzung weg fließt

0,5 l/s + 0,2 l/s + 0,3 l/s = 1 l/s.

Eine Stelle, an der sich mehrere Ströme treffen, nennt man einen Knoten. Zur Berechnung der Wasserstromstärke in Leitung D haben wir die Knotenregel benutzt:

> Die zu einem Knoten hinfließenden Ströme sind zusammen genauso stark wie die wegfließenden.

Aufgaben

1. Eine Badewanne, die 120 l fasst, ist in 20 Minuten voll. Wie groß ist die Stärke des Wasserstroms, der in die Wanne fließt?
2. In einem Wasserrohr beträgt die Stromstärke 2 l/s, in einem anderen 3 l/s. Kann man aus diesen Angaben schließen, in welchem Rohr das Wasser schneller fließt? Begründe deine Antwort.
3. Drei Flüsse mit den Stromstärken 5 m^3/s, 2 m^3/s und 3 m^3/s fließen an einer Stelle zusammen. Wie groß ist die Stromstärke des Flusses hinter dem Zusammenfluss?

2.6 Strom und Antrieb

Du hast den Wasserhahn ganz aufgedreht, aber es kommt nicht so viel Wasser heraus wie gewöhnlich. Woran könnte das liegen? Natürlich am Druck in der Wasserleitung. Der Unterschied zwischen dem Druck in der Wasserleitung und dem Druck außen, d. h. dem Normaldruck von 1 bar, ist der Antrieb für den Wasserstrom, der aus dem Hahn fließt. Je höher der Druck in der Leitung, desto größer ist auch der Druckunterschied, und desto größer ist die Stromstärke.

Wir füllen eine Plastiktüte mit Luft, die aus einem aufgepumpten Autoreifen austritt, Abb. 2.10. Wir machen das Experiment einmal mit einem Autoreifen, der auf 2 bar Überdruck, und einmal mit einem, der auf 0,5 bar Überdruck aufgepumpt ist. Wir stellen fest, dass die Plastiktüte im ersten Fall schneller voll wird als im zweiten. Auch hier hat die größere Druckdifferenz eine größere Stromstärke zur Folge.

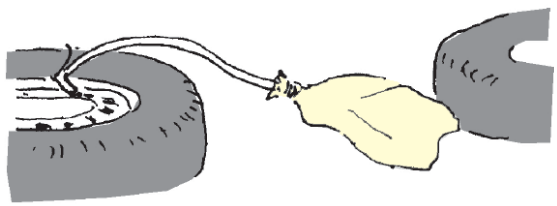


Abb. 2.10 Je größer der Druck im Reifen ist, desto schneller wird die Plastiktüte voll.

> Je größer die Druckdifferenz zwischen zwei Stellen ist (je größer der Antrieb ist), desto stärker ist der Strom, der von der einen zur anderen Stelle fließt.

Aufgabe

1. Durch das Rohr von Abb. 2.11 fließt ein Wasserstrom.
(a) Die Stromstärke am linken Ende des Rohrs beträgt 10 l/s. Wie groß ist die Stromstärke am rechten Ende des Rohrs? Begründe deine Antwort.
(b) Die Druckdifferenz zwischen dem linken Ende und der Stelle, wo das Rohr weiter wird, beträgt 2 bar. Ist die Druckdifferenz zwischen dieser Stelle und dem rechten Ende des Rohrs größer oder kleiner als 2 bar? Begründe deine Antwort.

Abb. 2.11 Ist die Druckdifferenz zwischen der Stelle, wo das Rohr weiter wird, und rechtem Ende des Rohrs größer oder kleiner als 2 bar?

2.7 Stromstärke und Widerstand

An einen Wasserhahn, aus dem das Wasser normalerweise in einem starken Strahl kommt, wird ein 50 m langer Gartenschlauch angeschlossen. Dreht man nun den Wasserhahn ganz auf, so ist der Wasserstrahl, der am Schlauchende austritt, wesentlich weniger stark. Die Wasserstromstärke ist mit Schlauch geringer als ohne, Abb. 2.12. Woran liegt das? Am Antrieb kann es nicht liegen, denn der ist in beiden Fällen derselbe. Für die Abnahme der Wasserstromstärke ist der Schlauch verantwortlich: Er behindert den Wasserstrom, er setzt ihm einen Widerstand entgegen.

Wir machen wieder ein Experiment mit einem Autoreifen und einer Plastiktüte. Wir füllen die Plastiktüte zweimal nacheinander mit der Luft aus ein und demselben Reifen. Beim ersten Mal verwenden wir als Verbindung einen möglichst kurzen Schlauch, und beim zweiten Mal einen sehr langen, der aber genauso dick ist wie der erste. Im ersten Versuch wird die Tüte schneller voll als im zweiten, die Luftstromstärke ist im ersten Fall größer als im zweiten. Der lange Schlauch setzt der Luft einen größeren Widerstand entgegen als der kurze. Man sagt, der lange Schlauch „hat“ einen größeren Widerstand.

Wir vergleichen nun den Widerstand von zwei Schläuchen oder Rohren, die gleich lang, aber verschieden dick sind, und stellen fest, dass der Widerstand umso geringer ist, je größer die Querschnittsfläche der Leitung ist.

> Jede Leitung setzt dem hindurchfließenden Gas- bzw. Flüssigkeitsstrom einen Widerstand entgegen. Der Widerstand ist umso größer, je kleiner die Querschnittsfläche der Leitung und je größer ihre Länge ist.

Die Stärke eines Stroms hängt also nicht nur vom Antrieb ab, sondern auch von der Beschaffenheit der Leitung, durch die er fließt.

> Die Stärke eines Gas- bzw. Flüssigkeitsstroms in einer Leitung ist umso größer,
> - je größer der Druckunterschied zwischen den Enden der Leitung ist,
> - je kleiner der Widerstand der Leitung ist.

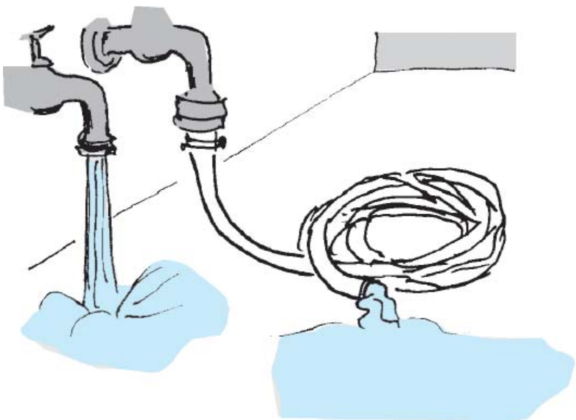


Abb. 2.12 Der Schlauch setzt dem Wasserstrom einen Widerstand entgegen.

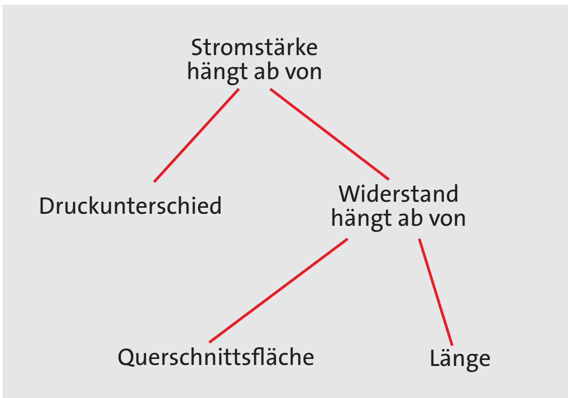


Abb. 2.13 Zusammenhang zwischen Stromstärke, Druckunterschied und Eigenschaften der Leitung

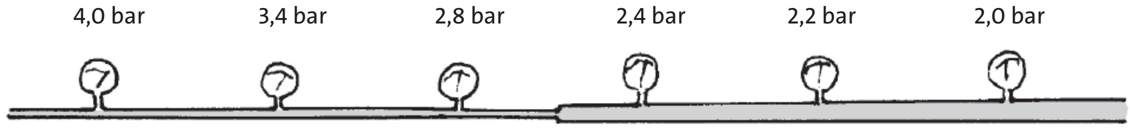


Abb. 2.14 Im engen Teil des Rohres ist der Druckabfall größer als im weiten.

Die Zusammenhänge zwischen Stromstärke, Druckunterschied und Widerstand sowie zwischen Widerstand, Länge und Querschnittsfläche der Leitung sind in Abb. 2.13 zusammengefasst.

Abb. 2.14 zeigt eine längere Wasserleitung, bei der in gleichen Abständen Manometer angebracht sind. Wir wollen versuchen, die von den Manometern angezeigten Werte zu verstehen.

Aus der Tatsache, dass das Manometer ganz links einen höheren Wert anzeigt als das Manometer ganz rechts, schließen wir, dass das Wasser von links nach rechts fließt: vom hohen zum niedrigen Druck. Aber schon vom ersten zum zweiten Manometer muss der Druck abnehmen, denn um diese Strecke zu überwinden, braucht das Wasser einen Antrieb, und ebenso vom zweiten zum dritten usw. Wir stellen außerdem fest, dass im dünnen Teil des Rohres die Druckunterschiede zwischen zwei benachbarten Messstellen jeweils gleich sind, nämlich 0,6 bar. Auch sind die Druckunterschiede zwischen zwei benachbarten Messstellen auf dem dicken Teil des Rohres jeweils dieselben: 0,2 bar. Allerdings ist die Druckdifferenz zwischen zwei benachbarten Manometern auf dem dünnen Teil nicht dieselbe wie auf dem dicken. Aber auch das ist leicht zu verstehen: Um dieselbe Wassermenge durch das enge Rohr zu drücken, ist ein größerer Druckunterschied nötig, als um ihn durch das weite zu drücken.

2.8 Hydraulische Energieübertragung

Ein Bagger ist eine vielseitige Maschine. Er kann sich fortbewegen, er kann sein Oberteil drehen, er kann seinen Greifarm schwenken und knicken, und er kann die Schaufel am Ende des Arms kippen, Abb. 2.15. All diese Tätigkeiten werden ermöglicht durch ein System von Hydraulikstromkreisen.

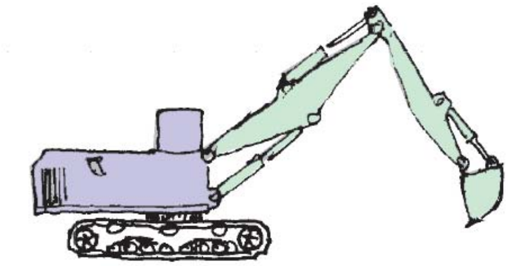


Abb. 2.15 Der Bagger kann fahren, sein Oberteil drehen, den Arm schwenken und knicken und seine Schaufel kippen.

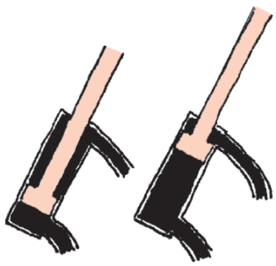


Abb. 2.16 Hydraulikzylinder

Ein Dieselmotor treibt eine Pumpe an. Die Pumpe drückt Hydrauliköl durch Rohre und Schläuche zu den einzelnen Stellen, an denen etwas bewegt werden soll. Durch eine zweite Leitung fließt das Öl zurück zur Pumpe. Wo etwas gedreht werden soll (die Räder des Baggers und das Oberteil), befindet sich ein Hydraulikmotor, wo etwas hin- und herbewegt werden soll, ein Hydraulikzylinder, Abb. 2.16.

Abb. 2.17 zeigt einen Ausschnitt aus dem Hydrauliksystem des Baggers: die Pumpe und einen der Hydraulikmotoren. Man erkennt, dass das Hydrauliköl in einem geschlossenen Stromkreis fließt. In der Hinleitung zum Motor steht es unter hohem Druck, in der Rückleitung unter niedrigem.

Wir wollen die Vorgänge noch vom energetischen Gesichtspunkt aus beschreiben. Die Energie kommt vom Dieselmotor mit dem Energieträger Drehimpuls zur Pumpe. In der Pumpe

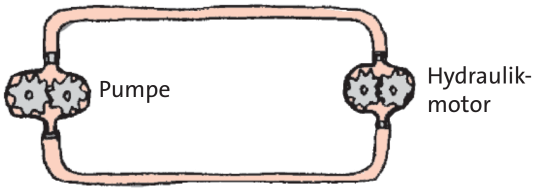


Abb. 2.17 Hydraulikstromkreis

wechselt sie den Träger: Sie wird auf das Hydrauliköl umgeladen. Mit dem Hydrauliköl in der Hochdruckleitung gelangt sie zum Hydraulikmotor und wird dort wieder umgeladen auf den Drehimpuls. Das Öl fließt, nachdem es seine Energie abgeladen hat, zurück zur Pumpe. Abb. 2.18 zeigt das entsprechende Flussbild.

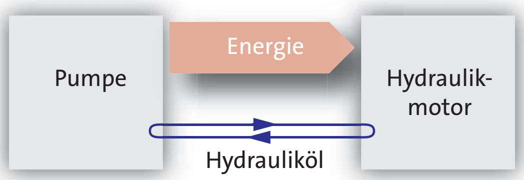


Abb. 2.18 Energieflussbild eines hydraulischen Antriebs

3 IMPULS UND IMPULSSTRÖME

Wir beginnen mit einem sehr umfangreichen Teilgebiet der Physik: mit der Mechanik. Hier zunächst eine vorläufige Definition: Die Mechanik befasst sich mit der Bewegung von Gegenständen. Wir werden zwar nach und nach sehen, dass diese Definition zu einschränkend ist; im Augenblick ist sie aber ausreichend.

Die Mechanik ist der älteste Teil der Physik. Die wichtigsten Gesetze der Mechanik sind seit mehr als 300 Jahren bekannt. Es war lange Zeit das erklärte Ziel der Physik, das ganze Naturgeschehen mechanisch zu deuten, auf die Mechanik zurückzuführen, und zwar nicht nur diejenigen Vorgänge, die offensichtlich Bewegungen darstellen, sondern auch thermische, optische, elektrische und chemische Prozesse. Die ganze Welt wäre dann nichts anderes als ein riesiger, sehr komplizierter „Mechanismus".

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts weiß man, dass dieser Standpunkt nicht zu halten ist. Andere Teile der Physik sind gleichberechtigt zur Mechanik, z. B. die Elektrizitätslehre und die Wärmelehre. Und normalerweise spielen bei einem Vorgang sowohl Mechanik als auch Elektrizität und Wärme und andere Erscheinungen der Physik eine Rolle. Wenn wir uns im Folgenden mit der Mechanik befassen, betrachten wir also immer nur eine Seite der Vorgänge: die mechanische Seite. Wenn wir einen Gegenstand untersuchen, wird uns interessieren, ob und wie er sich bewegt. Es wird uns nicht interessieren, welche Temperatur er hat, ob er elektrisch geladen ist oder welche Farbe er hat; und natürlich werden wir uns schon gar nicht für Probleme interessieren, die gar nicht in die Physik gehören, z. B. wie teuer der Gegenstand ist, oder ob er schön oder hässlich ist.

Bevor wir mit der Mechanik beginnen, müssen wir im nächsten Abschnitt zunächst noch einiges über das wichtigste Werkzeug des Physikers lernen: die physikalische Größe.

3.1 Physikalische Größen

Es ist charakteristisch für die Physik, dass sie die Natur quantitativ beschreibt. Mit „quantitativ" ist gemeint, dass sie ihre Aussagen in Zahlen fasst. So ist ein Physiker nicht zufrieden, wenn er weiß, ein Gegenstand habe eine hohe Temperatur, eine geringe Masse oder eine kleine Geschwindigkeit. Er versucht vielmehr, sich die Werte von Temperatur, Masse und Geschwindigkeit zu be-

Name der Größe	Symbol
Masse	m
Geschwindigkeit	v
Zeit	t
Volumen	V
Energie	E
Druck	p

Tab. 3.1 Namen und Abkürzungen einiger physikalischer Größen

schaffen. Sein Ziel könnte es also sein, zu berechnen oder durch Messung festzustellen, dass eine Temperatur 1530 °C beträgt, eine Masse 5,3 Milligramm oder eine Geschwindigkeit 882 Meter pro Sekunde.

Man nennt Temperatur, Masse und Geschwindigkeit physikalische Größen. Es gibt viele andere physikalische Größen. Eine ganze Reihe davon wird dir bereits bekannt sein, andere lernst du im Verlauf des Physikunterrichts noch kennen.

> Die physikalischen Größen gehören zu den wichtigsten Werkzeugen des Physikers.

Wir wollen uns einige Grundregeln für den Umgang mit physikalischen Größen ins Gedächtnis rufen; Regeln, die du zwar längst kennst, die dir aber vielleicht nicht bewusst waren, und die du vielleicht auch nicht immer befolgt hast.

Jede physikalische Größe wird durch einen Buchstaben abgekürzt. Diese Abkürzungen sind international festgelegt. Tab. 3.1 zeigt einige Beispiele.

Beachte, dass es nicht egal ist, ob das abkürzende Symbol ein Klein- oder ein Großbuchstabe ist. Oft steht ein bestimmter Kleinbuchstabe für eine andere physikalische Größe als der entsprechende Großbuchstabe. So bedeutet z. B. v die Geschwindigkeit und V das Volumen. Manchmal ist für eine Größe mehr als ein Symbol zulässig. So bezeichnet man die Energie nicht nur mit E, sondern auch mit W.

Jede Größe hat eine Maßeinheit. So ist die Maßeinheit der Zeit die Sekunde, die der Energie das Joule und die des Drucks das Bar. Tab. 3.2 gibt einige Beispiele für Maßeinheiten.

Die Einheit stellt einen ganz bestimmten Betrag der Größe dar. Man gibt also den Wert einer Größe immer in Vielfachen oder Bruchteilen seiner Einheit an. Wenn man sagt, „der Energieinhalt eines Gegenstandes beträgt 1000 Joule", so meint man, dass der Gegenstand 1000-mal die festgelegte Energieeinheit „1 Joule" enthält.

Genauso wie der Name einer Größe wird der Name ihrer Maßeinheit abgekürzt. So kürzt man „Meter" ab durch „m", „Joule" durch „J" und „Sekunde" durch „s". Damit man die Symbole von physikalischen Größen nicht mit denen von Maßeinheiten verwechselt, werden die Größensymbole kursiv gedruckt. So bedeutet m die physikalische Größe Masse, aber m die Maßeinheit Meter. Auch die Maßeinheiten sind international festgelegt. In Tab. 3.3 ist das bisher Gesagte für einige Größen zusammengefasst. Die Tabelle enthält 1. die Namen einiger Größen, 2. die Abkürzungen dieser Namen, 3. die entsprechenden Maßeinheiten und 4. die Abkürzungen der Maßeinheiten.

Name der Größe	Maßeinheit
Masse	Kilogramm
Geschwindigkeit	Meter pro Sekunde
Zeit	Sekunde
Volumen	Kubikmeter
Energie	Joule
Druck	Bar

Tab. 3.2 Namen und Maßeinheiten einiger physikalischer Größen

Name der Größe (Symbol)	Maßeinheit (Symbol)
Masse (m)	Kilogramm (kg)
Geschwindigkeit (v)	Meter pro Sekunde (m/s)
Zeit (t)	Sekunde (s)
Volumen (V)	Kubikmeter (m^3)
Energie (E)	Joule (J)
Druck (p)	Bar (bar)

Tab. 3.3 Namen und Maßeinheiten einiger physikalischer Größen und Abkürzungen für beide

Vorfaktor	Abkürzung	Bedeutung
kilo	k	Tausend
mega	M	Million
giga	G	Milliarde
tera	T	Billion
milli	m	Tausendstel
micro	µ	Millionstel
nano	n	Milliardstel
pico	p	Billionstel

Tab. 3.4 Bestimmungswörter, durch die Vielfache und Bruchteile von Maßeinheiten gekennzeichnet werden

Dank der Abkürzungen von Namen und Maßeinheiten kann man bestimmte physikalische Aussagen sehr kompakt schreiben. Statt „die Geschwindigkeit beträgt hundert Meter pro Sekunde", schreibt man einfach

$v = 100$ m/s.

Oder statt „die Energie beträgt vierzigtausend Joule", schreibt man

$E = 40\,000$ J.

> Verwechsle nicht die Namen von Größe und Maßeinheit!
> Verwechsle nicht die Symbole für Größe und Maßeinheit!

Oft hat man es mit sehr großen oder sehr kleinen Beträgen einer physikalischen Größe zu tun. Man kann dann als Einheit bestimmte Vielfache bzw. Bruchteile der normalen Einheit benutzen. Man kennzeichnet diese Vielfachen und Bruchteile, indem man vor den normalen Einheitennamen ein Bestimmungswort setzt. Die Bedeutungen der Bestimmungswörter sind in Tab. 3.4 aufgelistet. Jedes Bestimmungswort hat eine bestimmte Abkürzung. Auch diese Abkürzungen sind in Tab. 3.4 enthalten. So ist zum Beispiel:

40 000 Joule = 40 kJ = 0,04 MJ,

oder

0,000 002 m = 0,002 mm = 2 µm.

Aufgaben

1. Nenne vier Größen (andere als in Tab. 3.1), ihre Maßeinheiten sowie die Symbole für die Größen und die Maßeinheiten.
2. Schreibe die folgenden Ausdrücke kürzer, unter Verwendung der in Tab. 3.4 aufgeführten Bestimmungswörter:
   $E = 12\,000\,000$ J
   $v = 1\,500$ m/s
   $p = 110\,000$ Pa.
3. Gib die Geschwindigkeit $v = 72$ km/h in der Maßeinheit m/s an.
4. Nenne Maßeinheiten von Größen, die heute nicht mehr in Gebrauch sind.

3.2 Impuls und Geschwindigkeit

Nach unserer vorläufigen Definition befasst sich die Mechanik mit der Bewegung von Gegenständen oder Körpern, wie man auch sagt.

Damit wir mit einer physikalischen Beschreibung der Bewegung beginnen können, wollen wir uns als Erstes die dazu notwendigen Werkzeuge beschaffen. Du erinnerst dich, dass unsere wichtigsten Werkzeuge die physikalischen Größen sind. Wir werden nach und nach eine Menge Größen kennenlernen. Im Augenblick können wir uns aber mit nur zwei Größen begnügen, zwei Größen, durch die man den Bewegungszustand eines Körpers charakterisieren kann. Eine von ihnen ist dir längst vertraut: die Geschwindigkeit, abgekürzt v. Für die Geschwindigkeit gibt es eine ganze Reihe verschiedener Maßeinheiten: Kilometer pro Stunde („Stundenkilometer"), Knoten, Millimeter pro Tag etc. Die in der Physik benutzte Einheit ist, wie wir bereits im vorigen Abschnitt gesehen haben, Meter pro Sekunde, abgekürzt m/s.

Die zweite Größe, die wir brauchen, ist dir als physikalische Größe, d. h. als ein Gebilde, dem man Zahlenwerte zuordnen kann, sicher noch nicht bekannt. Abgesehen davon kennst du sie aber schon recht gut. Und du wirst dich schnell so gut mit ihr anfreunden, dass du in der Lage sein wirst, ihre Werte zu bestimmen. Es handelt sich wieder um eine Größe, mit der man eine Bewegung beschreiben kann, mit der man zum Beispiel ein ruhendes von einem bewegten Fahrzeug unterscheiden kann. Gegenüber der Geschwindigkeit hat sie allerdings eine Besonderheit: Sie stellt etwas dar, was in einem Körper enthalten ist, wenn er sich bewegt, und was nicht in ihm enthalten ist, wenn er ruht. Jeder kennt Begriffe, die genau diese Eigenschaft beschreiben. Jeder von uns sagt zum Beispiel, ein schwerer rollender Wagen habe „Schwung" oder „Wucht". Derselbe Wagen hat, wenn er sich nicht bewegt, keinen Schwung und keine Wucht. Die Eigenschaften von dem, was man umgangssprachlich Schwung oder Wucht eines Gegenstandes nennt, stimmen nun sehr gut überein mit den Eigenschaften der physikalischen Größe, die wir suchen. Und man könnte eigentlich diese Größe sogar genauso nennen, nämlich zum Beispiel „Schwung". Es hat sich aber ein bestimmter Fachausdruck für sie eingebürgert. Man nennt diese Größe „Impuls". Ihr Symbol ist p. (Achtung: Das Symbol ist dasselbe wie das für den Druck.)

> Ein bewegter Körper enthält Impuls. Bewegt er sich schnell, und ist er schwer, so enthält er viel Impuls. Bewegt er sich nicht, so enthält er keinen Impuls.

Wie man quantitativ feststellt, wie viel Impuls (Schwung) ein Körper enthält, werden wir später diskutieren. Wir wollen aber schon jetzt die Maßeinheit des Impulses kennenlernen. Ihr Name ist Huygens, abgekürzt Hy, nach dem Physiker Christian Huygens (1629 — 1695), der maßgeblich zur Erfindung der Größe Impuls beigetragen hat.

Wir erarbeiten im Folgenden die wichtigsten Eigenschaften der Größe p. Es genügt dabei, immer daran zu denken, dass der Impuls im Wesentlichen das ist, was man umgangssprachlich Schwung nennt. Auf einer Straße fahren zwei gleich gebaute Autos, das eine schneller, das andere langsamer, Abb. 3.1. In welchem der beiden Fahrzeuge steckt mehr Impuls? (Welches Auto hat mehr Schwung?) In dem, das sich schneller bewegt, das die höhere Geschwindigkeit hat.

Abb. 3.1 Die beiden Wagen sind gleich gebaut. Der mit der höheren Geschwindigkeit hat mehr Impuls.

> Ein Körper enthält umso mehr Impuls, je höher seine Geschwindigkeit ist.

Ein Lastwagen und ein Personenwagen fahren mit derselben Geschwindigkeit, z. B. mit 60 km/h, nebeneinander her. Der Lastwagen habe ein Gewicht von 8 000 kg, der Personenwagen wiege 1200 kg, Abb. 3.2.

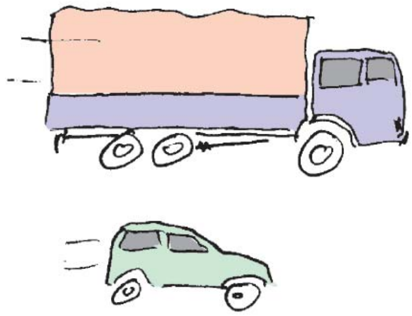


Abb. 3.2 Die beiden Wagen fahren gleich schnell. Der schwere hat mehr Impuls als der leichte.

Welches der beiden Fahrzeuge hat mehr Impuls? Der Lastwagen natürlich. Die Größe, die man in kg misst, und die man umgangssprachlich „Gewicht" nennt, heißt in der Naturwissenschaft Masse. Wir haben daher:

> Ein Körper enthält umso mehr Impuls, je größer seine Masse ist.

Wir können auch jetzt schon angeben, wie die Maßeinheit Huygens des Impulses definiert ist:

> Ein Körper mit einer Masse von 1 kg und einer Geschwindigkeit von 1 m/s enthält 1 Hy.

Wir machen im Folgenden mehrere Experimente, bei denen die Reibung stören würde. Wir verwenden daher Wagen, die sehr gut gelagert sind. Eine Lagerung mit sehr geringer Reibung kann man erreichen, wenn man statt Räder ein Luftpolster verwendet. Abb. 3.3 zeigt eine Luftkissenbahn, wie man sie gern für solche Experimente benutzt. Die Schiene hat vier Reihen sehr feiner Löcher, aus denen Luft austritt. Die Gleiter be-

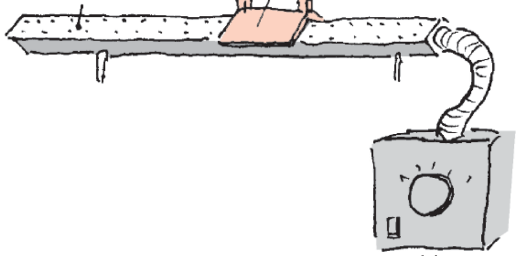


Abb. 3.3 Luftkissenbahn. Der Gleiter bewegt sich fast ohne Reibung.

rühren die Schiene nicht, sie schweben auf einem Luftkissen.

Ein sehr gut gelagertes Fahrzeug soll sich auf einer waagrechten Bahn bewegen. Es könnte sich dabei um einen Luftkissengleiter handeln, aber ebenso gut um einen Eisenbahnwagen (ohne Lokomotive), der auf waagrechten Schienen rollt. Wir betrachten das Fahrzeug zu drei verschiedenen Zeitpunkten, Abb. 3.4. Im ersten Zeitpunkt, Abb. 3.4a, bewegt sich das Fahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit; folglich steckt eine bestimmte Menge Impuls in ihm. Im zweiten Zeitpunkt, Abb. 3.4b, ist die Geschwindigkeit noch dieselbe, und im dritten Zeitpunkt, Abb. 3.4c, ebenfalls. Den Impuls, den das Fahrzeug im ersten Zeitpunkt hatte, hat es also im zweiten und im dritten immer noch; der Impuls ist einfach im Fahrzeug geblieben – ähnlich wie irgendeine Ladung, die er tragen könnte, und von der er nichts verliert.

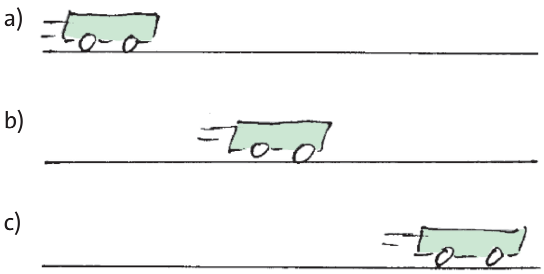


Abb. 3.4 Das Fahrzeug hat sehr gute Radlager. Es verliert keinen Impuls.

Ist ein Fahrzeug schlecht gelagert, so nimmt seine Impulsladung mit der Zeit ab. Was in diesem Fall mit dem Impuls passiert, wo er bleibt, untersuchen wir später. Zunächst wollen wir nur mit Fahrzeugen experimentieren, die gut gelagert sind, bei denen keine oder so gut wie keine Reibung auftritt.

Abb. 3.5a zeigt zwei gleich gebaute Gleiter; der linke, Gleiter A, bewegt sich nach rechts, der rechte, Gleiter B, ruht. Etwas später stößt A gegen B, und man beobachtet, dass nach dem Zusammenstoß A steht und sich B nach rechts bewegt, Abb. 3.5b.

Wir wollen diesen Vorgang erklären, indem wir angeben, was mit dem Impuls geschieht. Zu Anfang, d. h. vor dem Zusammenstoß, hatte A

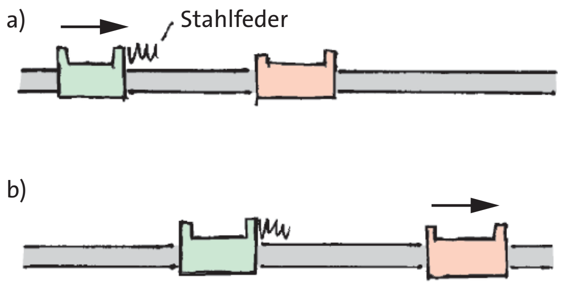


Abb. 3.5 Vor dem Zusammenstoß (a) bewegt sich nur der linke Gleiter. Danach (b) bewegt sich nur der rechte.

eine bestimmte Menge Impuls, sagen wir 12 Hy; B hatte keinen. Beim Zusammenstoß ist der ganze Impuls von A auf B übergegangen. Die ganzen 12 Huygens sind von A auf B umgeladen worden, sodass nach dem Stoß Gleiter A keinen Impuls mehr hat.

> Impuls kann von einem auf einen anderen Körper übergehen.

Im Versuch von Abb. 3.5 befand sich zwischen den beiden Gleitern ein elastischer Federpuffer. Wir führen nun denselben Versuch noch einmal aus, allerdings diesmal mit einem unelastischen Puffer: Wir ersetzen den Federpuffer durch ein Stückchen Knetmasse, Abb. 3.6.

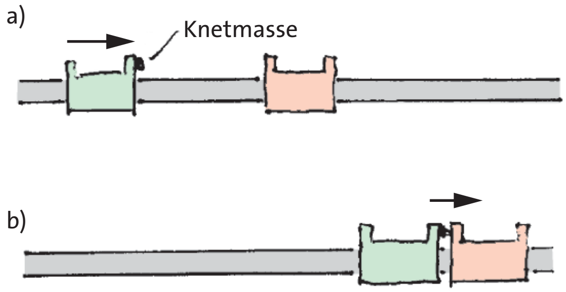


Abb. 3.6 Vor dem Zusammenstoß (a) bewegt sich der linke Gleiter und der rechte ruht. Danach (b) bewegen sich beide, allerdings mit geringerer Geschwindigkeit.

Der Ablauf des Experiments ist nun ganz anders. Zunächst bewegt sich zwar wieder Gleiter A, und Gleiter B ruht. Nach dem Zusammenstoß bewegen sich aber die Gleiter mit gleicher Geschwindigkeit nach rechts. Diese Geschwindigkeit ist kleiner als die des linken Gleiters vor dem Stoß. Wie ist hier die Erklärung? Diesmal ist nicht der ganze Impuls vom linken zum rechten Gleiter gegangen. Die 12 Hy haben sich vielmehr je zur Hälfte auf A und B verteilt, sodass am Ende jeder der Gleiter 6 Hy hat.

> Impuls kann sich auf mehrere Körper verteilen.

Was mit dem Impuls in Abb. 3.6 passiert, ist vergleichbar mit dem, was mit dem Wasser in Abb. 3.7 geschieht. In Abb. 3.7a befindet sich das ganze Wasser im linken Behälter. Wenn der Hahn geöffnet wird, fließt die Hälfte des Wassers in den rechten Behälter. Das Wasser verteilt sich also auf beide Behälter, genauso wie sich der Impuls in Abb. 3.6 beim Zusammenstoß auf beide Gleiter verteilt.

a)

b)

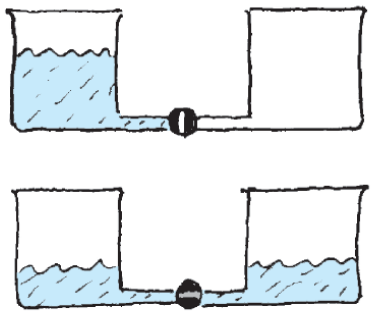


Abb. 3.7 Das Wasser verteilt sich auf beide Behälter, ähnlich wie sich der Impuls in Abb. 3.6 auf beide Gleiter verteilt.

Wir lassen nun Gleiter A (mit dem unelastischen Puffer) nicht gegen einen einzigen, sondern gegen zwei aneinander gekoppelte Gleiter B und C stoßen, Abb. 3.8. Jetzt verteilt sich der Impuls, den A zu Anfang hatte, gleichmäßig auf alle drei Gleiter A, B und C. Jeder hat jetzt nur noch 1/3 des Impulses, den A ursprünglich hatte. Hatte A anfangs einen Impuls von 12 Hy, so hat nach dem Zusammenstoß jeder Gleiter 4 Hy.

a)

b)

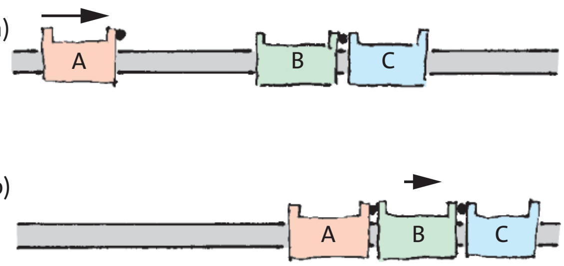


Abb. 3.8 Beim Stoß verteilt sich der Impuls von A auf alle drei Gleiter A, B und C.

Lässt man A gegen 3, 4 oder 5 ruhende Gleiter stoßen, so verteilt sich beim Stoß sein Impuls auf 4, 5 oder 6 Gleiter. Je länger der „Zug“ ist, gegen den A stößt, desto weniger Impuls bekommt jeder einzelne Gleiter ab, desto langsamer bewegt sich der Zug nach dem Stoß.

Statt gegen einen Zug aus Gleitern lassen wir schließlich A einfach gegen einen Puffer am Ende der Luftkissenbahn stoßen, Abb. 3.9. Gleiter A kommt natürlich sofort zum Stillstand. Wo ist diesmal der Impuls geblieben? Wer ist hier der Stoßpartner von A? Der Stoßpartner von A ist zunächst die Schiene. Der Impuls verteilt sich also auf A und die Schiene. Nun steht die Schiene fest auf dem Tisch. Der Impuls verteilt sich daher auf A, die Schiene und den Tisch. Schließlich steht aber der Tisch auf der Erde. Der Impuls verteilt sich also weiter auf Schiene, Tisch und Erde. Für Schiene und Tisch bleibt allerdings praktisch nichts mehr übrig; in anderen Worten: Der Impuls fließt in die Erde ab. Er wird dabei so weit verteilt, „verdünnt“ sozusagen, dass man nichts mehr von ihm merkt.

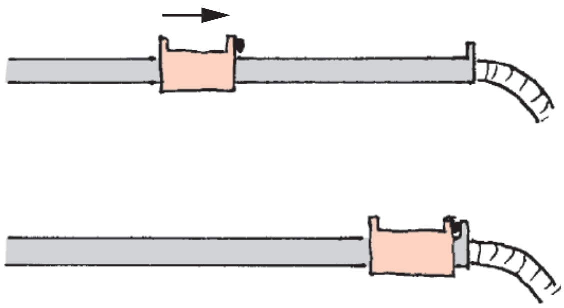


Abb. 3.9 Der Impuls des Gleiters fließt beim Stoß in die Erde ab.

Eine andere Version des letzten Experiments sieht so aus: Wir setzen einen Gleiter in Bewegung und schalten, bevor der Gleiter das Ende der Schiene erreicht hat, das Gebläse ab. Das Luftpolster verschwindet, der Gleiter setzt auf und kommt zum Stillstand. Wieder ist sein Impuls in die Erde abgeflossen. Solange das Luftkissen noch vorhanden war, war die Bewegung des Gleiters reibungsfrei. Indem wir das Luftkissen entfernt haben, haben wir die Reibung eingeschaltet. Wir können daher schließen:

> Ist ein Fahrzeug schlecht gelagert, sodass es von selbst zum Stillstand kommt, fließt sein Impuls in die Erde ab.

Auch hier ist ein Vergleich von Impuls und Wasser nützlich. Ein schlecht gelagertes Fahrzeug, das ausrollt, also seinen Impuls an die Erde verliert, entspricht einem undichten Eimer, Abb. 3.10. Das Wasser verteilt sich nach und nach in der Umgebung, sodass man schließlich nichts mehr von ihm merkt.

Wir machen nun wieder ein Experiment mit zwei Fahrzeugen (oder Gleitern auf der Luftkissenbahn). Die Fahrzeuge haben einen unelastischen Puffer und werden so angestoßen, dass sie sich mit gleicher Geschwindigkeit aufeinander zu bewegen. Sie stoßen zusammen und bleiben stehen, Abb. 3.11. Wieder stellen wir die Frage: Wo ist der Impuls geblieben? In die Erde kann er diesmal nicht gegangen sein, denn die Fahrzeuge sind nach wie vor gut gelagert. Übrigens: Zwei

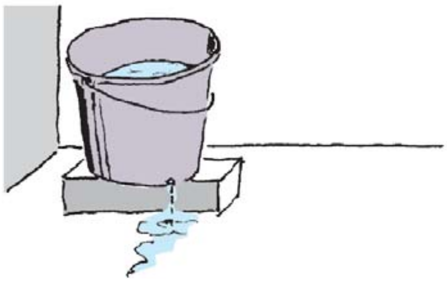


Abb. 3.10 Eimer mit Leck. Das Wasser verteilt sich in der Umgebung, sodass man schließlich nichts mehr von ihm sieht.

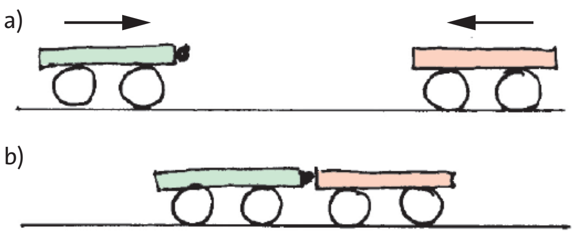


Abb. 3.11 Zwei Wagen bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit aufeinander zu. Beim Zusammenstoß kommen sie beide zur Ruhe.

Gegenstände, die im leeren Weltraum auf diese Art zusammengestoßen wären, wären genauso zum Stillstand gekommen, und im Weltraum gibt es ja keine Erde, die den Impuls hätte aufnehmen können. Die Antwort auf unsere Frage muss so lauten: Die Impulse der beiden Fahrzeuge haben sich irgendwie ausgeglichen, kompensiert. Aber wie ist das möglich?

Die Erklärung ist dann ganz einfach, wenn man den Impuls des einen Körpers positiv und den des anderen negativ zählt. Hat das eine Fahrzeug vor dem Zusammenstoß +20 Hy und das andere –20 Hy, so ist der Gesamtimpuls schon vor dem Zusammenstoß 0 Hy. Und nach dem Stoß ist er, wie das Experiment zeigt, immer noch 0 Hy — die Bilanz stimmt also. Wir schließen daraus:

> Der Impuls kann positive und negative Werte annehmen.

Welcher der beiden Körper in Abb. 3.11a hat nun den positiven und welcher den negativen Impuls? Das kann man festlegen, wie man will. Du weißt aus dem Mathematikunterricht, dass es üblich ist, die positive x-Achse nach rechts zu zeichnen. Genauso gehen wir beim Impuls vor. Wir legen fest:

> Der Impuls eines Körpers ist positiv, wenn sich der Körper nach rechts bewegt, und negativ, wenn sich der Körper nach links bewegt.

Aufgaben

1. Ein Fahrzeug, das eine Impulsmenge von 1 500 Hy enthält, stößt gegen vier ruhende Fahrzeuge. Alle Fahrzeuge sind gleich gebaut und hängen nach dem Stoß fest aneinander. Wie groß ist der Gesamtimpuls aller fünf Fahrzeuge nach dem Stoß? Wie viel Impuls steckt in jedem einzelnen?
2. Zwei zusammengekoppelte Wagen mit dem Gesamtimpuls 12 000 Hy stoßen gegen einen dritten, der sich zunächst nicht bewegt. Alle Wagen sind gleich gebaut und hängen nach dem Stoß zusammen. Wie viel Impuls enthält jeder Wagen vor dem Stoß? Wie viel Impuls enthält jeder Wagen nach dem Stoß?
3. Zwei gleich gebaute Gleiter laufen mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit aufeinander zu. Sie sind mit elastischen Federpuffern ausgerüstet. Der linke Gleiter enthält die Impulsmenge +5 Hy, der rechte enthält –5 Hy. Was passiert während des Zusammenstoßes mit dem Impuls der Gleiter?

Aufgaben

4. Zwei Wagen mit zusammen 500 Hy rollen nach rechts und stoßen gegen einen dritten, der ihnen entgegenkommt. Der dritte hat –200 Hy. Alle drei Wagen sind gleich gebaut und hängen nach dem Stoß aneinander. Wie viel Impuls hat jeder Wagen nach dem Stoß? In welche Richtung bewegen sich die Wagen?
5. Ein Ball fliegt waagrecht gegen eine Wand und prallt ab, sodass er mit der entgegengesetzten Geschwindigkeit von der Wand wegfliegt. Sein Impuls war vor dem Aufprallen 1 Hy. Wie groß ist der Impuls nach dem Aufprallen? Wie groß ist der Impulsunterschied zwischen vorher und nachher? Wo ist der fehlende Impuls geblieben?

3.3 Impulspumpen

Wir waren zuletzt der Frage nachgegangen, an wen oder was ein Körper, dessen Geschwindigkeit abnimmt, seinen Impuls verliert. Wir hatten gefunden: Der Impuls fließt in die Erde. Wir stellen nun die umgekehrte Frage: Woher bekommt denn ein Fahrzeug seinen Impuls, wenn es beschleunigt wird?

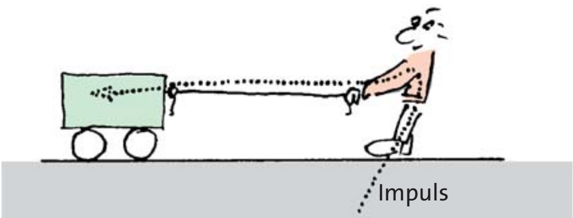


Abb. 3.12 Während Willy zieht, nimmt der Impuls des Wagens zu.

Willy setzt einen Wagen in Bewegung, indem er mithilfe eines Seils an ihm zieht, Abb. 3.12. Während er zieht, wird der Wagen schneller, und das heißt: Sein Impuls nimmt zu. Woher bekommt der Wagen den Impuls? Von Willy? Dann müsste Willys Impuls abnehmen, was er aber nicht tut. Willy ruht am Anfang und am Ende, sein Impuls war und bleibt 0 Hy.

Wir können allerdings das Experiment etwas abändern, sodass der Impuls tatsächlich von der Person kommt, Abb. 3.13. Wenn Lilly hier am Seil zieht, nimmt der Impuls des linken Wagens zu. Lilly, einschließlich Skateboard, setzt sich ebenfalls in Bewegung, aber nach links. Sie bekommt negativen Impuls, oder in anderen Worten: Ihr

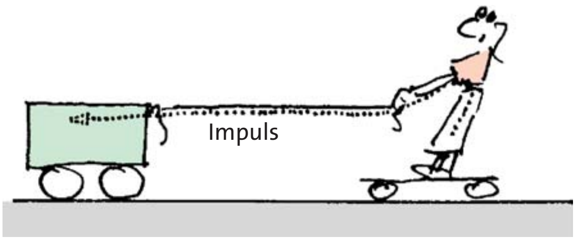


Abb. 3.13 Lilly befördert durch das Seil Impuls von rechts nach links.

Impuls nimmt ab. Während des Ziehens ist also Impuls von Lilly (+ Skateboard) durch das Seil in den Wagen links geflossen. Dafür, dass der Impuls von rechts nach links geflossen ist, hat Lilly mit ihren Muskeln gesorgt. Sie hat sich als „Impulspumpe“ betätigt.

Wir sehen nun, was im Fall der Abb. 3.12 passiert sein muss: Hier hat Willy Impuls aus der Erde durch das Seil in den Wagen gepumpt. Dass der Impuls der Erde dabei negativ wird, kann man genauso wenig sehen, wie die Zunahme des Erdimpulses, wenn ein Fahrzeug ausrollt (und dabei Impuls an die Erde abgibt).

Wir betrachten einige andere Beispiele dafür, dass Impuls von einem Körper in einen anderen gepumpt wird.

In Abb. 3.14 zieht Willy die beiden Wagen A und B zu sich heran, sodass die Wagen schneller werden. Der Impuls von A nimmt dabei zu, der von B nimmt immer größere negative Werte an, d. h., er nimmt ab. Willys Impuls ist und bleibt 0 Hy. Willy befördert also Impuls vom rechten in den linken Wagen. Er steht auf einem Skateboard, damit sichergestellt ist, dass kein Impuls von der Erde kommt oder in die Erde geht.

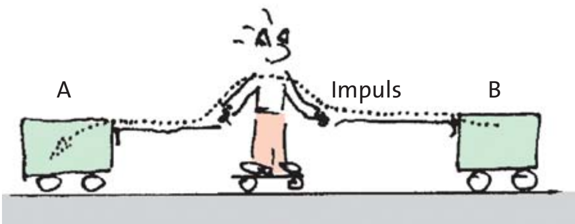


Abb. 3.14 Willy pumpt Impuls aus dem rechten Wagen in den linken.

Ein Auto fährt mit zunehmender Geschwindigkeit, d. h., sein Impuls nimmt zu. Hier arbeitet der Motor als Impulspumpe. Er befördert Impuls aus der Erde über die Antriebsräder (bei Personenwagen meist die Vorderräder) ins Auto, Abb. 3.15.

Abb. 3.15 Der Motor des Autos pumpt Impuls aus der Erde über die Antriebsräder in das Auto.

Ein Spielzeugauto mit Fernsteuerung steht auf einem Stück Pappe, unter dem sich Rollen befinden, Trinkhalme oder Bleistifte zum Beispiel, Abb. 3.16. Man startet das Auto, und zwar so, dass es nach rechts fährt. Sein Impuls nimmt während des Anfahrvorgangs zu. Gleichzeitig rollt aber die Pappunterlage nach links weg, d. h., ihr Impuls wird negativ, er nimmt ab. Der Motor des Autos hat also Impuls aus der Unterlage in den Wagen gepumpt.

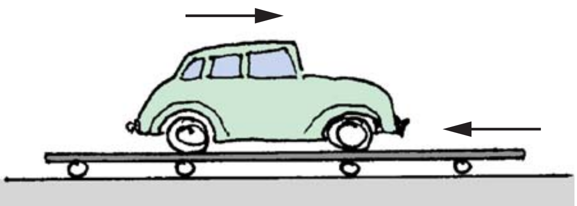


Abb. 3.16 Der Motor des Spielzeugautos pumpt Impuls aus der Pappunterlage ins Auto.

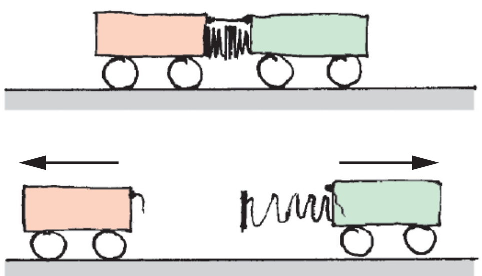


Abb. 3.17 Die Feder pumpt Impuls aus dem linken Wagen in den rechten.

Zwei Wagen (oder Gleiter auf der Luftkissenbahn) hängen über einen Faden aneinander, Abb. 3.17. An einem der Wagen ist ein Federpuffer befestigt. Der Faden ist so kurz, dass die Feder zusammengedrückt ist. Schneidet man nun den Faden durch, so setzen sich die Wagen in Bewegung, der rechte nach rechts und der linke nach links. Der rechte Wagen hat also (positiven) Impuls bekommen, der linke hat (positiven) Impuls verloren. Hier hat die Feder als Impulspumpe gewirkt. Sie hat, solange sie sich entspannte, Impuls vom linken in den rechten Wagen befördert.

3.4 Impulsleiter und -nichtleiter

Wir hatten gesehen, dass Impuls von einem Körper A in einen anderen Körper B gelangen kann. Wir sagen, der Impuls fließt von A nach B, oder wir sagen, es fließt ein Impulsstrom zwischen den Körpern A und B.

Eine notwendige Voraussetzung dafür, dass Impuls von A nach B fließen kann, ist, dass zwischen A und B eine Verbindung besteht. Dabei genügt nicht irgendeine beliebige Verbindung. Die Verbindung muss so beschaffen sein, dass sie für den Impuls durchlässig ist. Es muss eine „impulsleitende“ Verbindung sein. Wie sehen solche impulsleitenden Verbindungen aus? Was für Gegenstände leiten den Impuls? Was für Gegenstände leiten ihn nicht?

In Abb. 3.18a drückt Willy über eine Stange gegen einen Wagen. Der Wagen wird schneller, sein

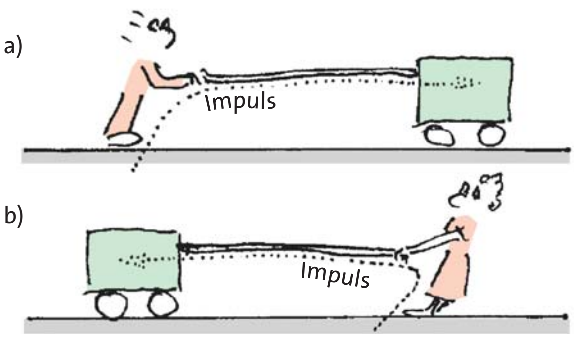


Abb. 3.18 Durch die Stange fließt Impuls aus der Erde in den Wagen. (a) Der Impuls fließt in der Stange nach rechts. (b) Der Impuls fließt in der Stange nach links.

Impuls nimmt zu. Willy pumpt also Impuls aus der Erde in den Wagen. In der Stange fließt der Impuls von links nach rechts. In Abb. 3.18b wird auch ein Wagen mit Impuls geladen – diesmal dadurch, dass Lilly an dem Wagen zieht, und zwar wieder mithilfe der Stange. Hier fließt der Impuls in der Stange von rechts nach links. An diesen beiden Vorgängen erkennt man, dass die Stange ein Impulsleiter ist. Es ist klar, dass es auf die genaue Form der Stange nicht ankommt. Ebenso wenig kommt es auf das Material an, aus dem die Stange besteht, vorausgesetzt es ist ein fester Stoff. Wir schließen:

Feste Stoffe leiten den Impuls.

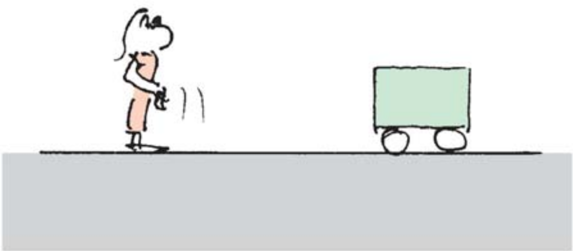


Abb. 3.19 Die Person versucht vergeblich, Impuls durch die Luft zu schicken.

Abb. 3.19 zeigt eine Person, die an Wunder glaubt. Sie versucht, den Wagen dadurch in Bewegung zu setzen, dass sie gegen die Luft drückt – in der Hoffnung, dass die Luft den Impuls bis zum Wagen weiterleitet. Schließlich lässt sie sich aber überzeugen:

Luft leitet den Impuls nicht.

Wir werden später sehen, dass dieser Satz nur mit Einschränkungen gilt. Auf jeden Fall wird aber seine Gültigkeit bei der Luftkissenbahn ausgenutzt: Die Luft zwischen Schiene und Gleiter verhindert, dass der Impuls des Gleiters in die Schiene abfließt.

In Abb. 3.20 untersucht Lilly die Impulsleitfähigkeit eines Seils und stellt fest, dass der Impuls gut von rechts nach links fließt, Abb. 3.20a, aber gar nicht von links nach rechts, Abb. 3.20b.

Seile leiten den Impuls nur in eine Richtung.

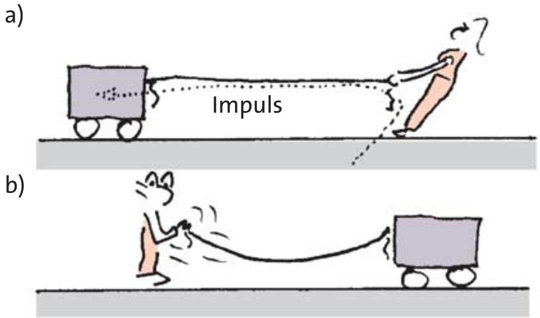


Abb. 3.20 Im Seil kann der Impuls von rechts nach links (a), aber nicht von links nach rechts (b) fließen.

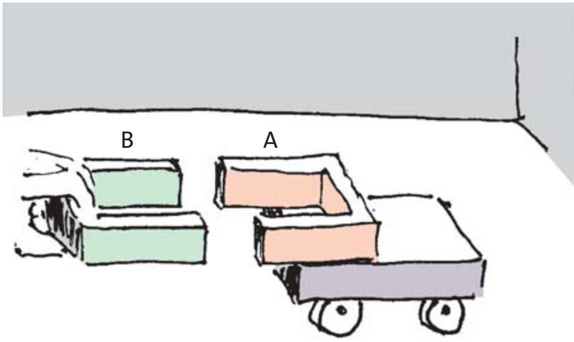


Abb. 3.21 Zwischen den Magneten befindet sich ein magnetisches Feld. Das Feld ist ein Impulsleiter.

Wir machen ein Experiment, das nicht ganz so leicht zu deuten ist wie die vorangehenden. Auf einem kleinen Fahrzeug wird ein Magnet A befestigt, Abb. 3.21. Man nähert diesem einen zweiten Magneten B, und zwar so, dass sich gleichnamige Pole gegenüberstehen: Nordpol bei Nordpol und Südpol bei Südpol. Kommt man nun mit Magnet B genügend nah an Magnet A heran, so setzt sich der Wagen in Bewegung, sein Impuls nimmt zu. Wir haben diesen Impuls aus der Erde über Magnet B und Magnet A in den Wagen gepumpt.

Die Frage ist nun, wie der Impuls von B nach A gekommen ist. Wir schließen aus der Beobachtung, dass zwischen den Magneten eine Verbindung existieren muss. Zwischen den Magneten muss sich ein unsichtbares Gebilde befinden, das für den Impuls leitfähig ist. Dieses Gebilde, das jeden Magnetpol umgibt, nennt man ein magnetisches Feld.

Magnetische Felder leiten den Impuls.

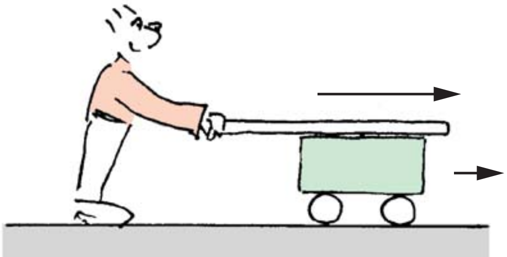


Abb. 3.22 Impulsübertragung bei einem Reibungsvorgang

Abb. 3.22 zeigt Willy, wie er einen Wagen dadurch mit Impuls lädt, dass er eine Stange über den Wagen schiebt. Dabei rutscht die Stange über die Oberseite des Wagens hinweg, sie ist also nicht am Wagen befestigt.

Auf diese Art bekommt man tatsächlich Impuls in den Wagen, allerdings nicht sehr wirkungsvoll. Man sieht, dass die Impulsübertragung umso besser geht, je größer die Reibung zwischen Stange und Wagen ist. Gleitet die Stange sehr leicht über den Wagen, so ist der Impulsstrom von der Stange zum Wagen gering. Wenn die Reibung groß ist, wenn also zum Beispiel Stange und Wagen eine raue Oberfläche haben, so ist die Impulsübertragung gut. Wir schließen:

> Reiben zwei Gegenstände aneinander, so fließt Impuls vom einen zum anderen: je größer die Reibung, desto mehr.

Im Grunde haben wir die Gültigkeit dieser Regel schon immer vorausgesetzt: Damit der Impuls eines Gegenstandes nicht in die Erde abfließt, muss man dafür sorgen, dass zwischen Gegenstand und Erde keine impulsleitende Verbindung besteht; man muss dafür sorgen, dass die Reibung gering ist.

Die wichtigste Vorrichtung, die dazu dient, die Reibung zwischen einem Körper und der Erde zu vermindern, ist das Rad.

> Räder dienen der Impulsisolation.

Es gibt aber durchaus noch andere Methoden: die Luft bei Luftkissenfahrzeugen und auch bei Flugzeug und Hubschrauber, die Kufen bei Schlitten und Schlittschuhen, das Wasser bei Flusskähnen und Schiffen.

Aufgaben

1. Seile leiten den Impuls nicht nach rechts, sondern nur nach links. Erfinde eine Vorrichtung, die den Impuls nicht nach links, sondern nur nach rechts leitet.
2. Ein Autofahrer versucht bei Glatteis, scharf zu bremsen. Was passiert? Für den Bremsvorgang spielt die Impulsleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Was ist dazu im Fall des Glatteises zu sagen?
3. Ein Autofahrer versucht bei Glatteis, schnell anzufahren. Was passiert?

3.5 Antriebe und Bremsen

Räder sind nur dann Nichtleiter für den Impuls, wenn sie frei laufen. Die angetriebenen Räder eines Autos sind keine Nichtleiter für den Impuls. Sie sind über den Motor mit Fahrgestell und Karosserie verbunden – damit der Motor Impuls aus der Erde ins Auto pumpen kann.

Oft möchte man den in einem Fahrzeug enthaltenen Impuls möglichst schnell loswerden, Abb. 3.23. Zu diesem Zweck haben Fahrzeuge eine Bremse. Beim Bremsen wird die Reibung der Räder sehr stark erhöht; die Räder werden in gute Impulsleiter verwandelt, sodass der Impuls des Fahrzeugs schnell in die Erde abfließt. Eine Bremse ist also eine Leitung für den Impuls, die man „auf- und zudrehen“ kann, eine Art Ventil oder Schalter für den Impulsstrom.

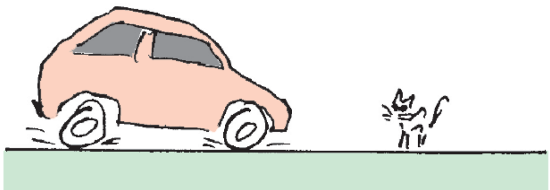


Abb. 3.23 Das Fahrzeug soll seinen Impuls schnell loswerden.

Ein Auto, das schnell fährt, verliert Impuls nicht nur durch die Reibung der Räder, sondern auch durch die Reibung zwischen der Fahrzeugoberfläche und der Luft. Bei Geschwindigkeiten über etwa 80 km/h ist dies sogar die größere Verlustquelle. Bei diesem Vorgang fließt der Impuls vom Auto zunächst in die Luft. Dass die Luft den Impuls tatsächlich enthält, erkennt man daran, dass sie sich, kurz nachdem das Auto vorbei ist, noch sehr stark bewegt. Nach und nach gibt sie aber den Impuls an die Erde ab (und zwar wieder durch Reibung).

Dass Impuls in der Luft stecken kann, zeigt der in Abb. 3.24 dargestellte Versuch. Auf einen kleinen Wagen wird ein aufgeblasener Luftballon montiert. Öffnet man den Ballon, so setzt sich der Wagen in Bewegung. Die Ballonhülle drückt die Luft aus dem Ballon nach links hinaus. Diese Luft bekommt negativen Impuls, der Wagen positiven.

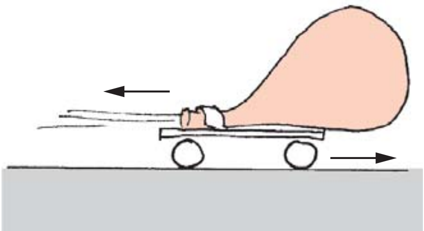


Abb. 3.24 Die ausströmende Luft bekommt negativen, der Wagen positiven Impuls.

Der Antrieb des Wagens in Abb. 3.24 funktioniert im Wesentlichen so wie der einer Rakete. Auch eine Rakete bekommt ihren Impuls dadurch, dass sie nach hinten ein Gas mit hoher Geschwindigkeit ausstößt. Der größte Teil der Rakete wird von zwei Tanks eingenommen, Abb. 3.25. Der eine enthält den Brennstoff, z. B. flüssigen Wasserstoff, der andere enthält flüssigen Sauerstoff. Bei der Verbrennung des Wasserstoffs entsteht Wasserdampf, der einen sehr hohen Druck hat. Er strömt

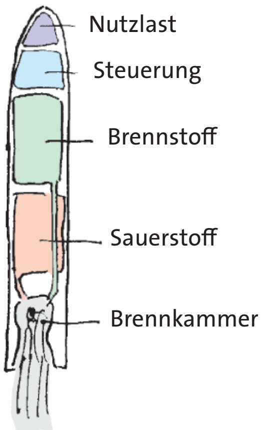


Abb. 3.25 Aufbau einer Rakete

mit hoher Geschwindigkeit hinten aus der Rakete hinaus und nimmt dabei Impuls mit. Dadurch bekommt die Rakete Impuls des entgegengesetzten Vorzeichens.

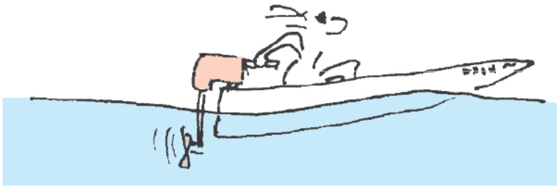


Abb. 3.26 Die Schraube pumpt Impuls aus dem Wasser ins Boot.

Schiffe werden durch eine Schraube angetrieben, Abb. 3.26: eine Art Propeller, der sich unter der Wasseroberfläche dreht und vom Motor des Schiffs angetrieben wird. Die Schraube setzt das Wasser nach hinten in Bewegung: Sie lädt es mit negativem Impuls. Den entsprechenden positiven Impuls bekommt das Schiff. In anderen Worten: Die Schraube pumpt (positiven) Impuls aus dem Wasser ins Schiff. Soll das Schiff bremsen, lässt man die Schraube rückwärts laufen. Sie pumpt dann Impuls aus dem Schiff ins Wasser. Ähnlich wie der Schiffsantrieb arbeitet der Antrieb von Flugzeugen. Nur wird hier der Impuls nicht dem Wasser, sondern der Luft entnommen.

Bei einem Propellerflugzeug pumpen die Propeller Impuls aus der Luft ins Flugzeug. Beim Jet sorgt dafür ein Strahltriebwerk. Ein Strahltriebwerk ist im Grunde nichts anderes als ein sehr starkes, im Triebwerksgehäuse verstecktes Gebläse, das von einer Turbine angetrieben wird. Die Turbine bekommt ihre Energie mit Kerosin, ein dem Benzin verwandter Treibstoff.

Flugzeuge müssen nach der Landung schnell bremsen: Sie müssen schnell sehr viel Impuls loswerden. Sie können den Impuls zum einen, genauso wie ein Auto, über die Räder in die Erde ableiten. Wirksamer ist aber eine Methode, die man Schubumkehr nennt. In manchen Flugzeugen lässt sich das gut vom Innern des Flugzeugs aus durch das Fenster beobachten. An jedem Triebwerk werden zwei Klappen ausgefahren, die die hinten herausgeblasene Luft nach vorn umlenken, Abb. 3.27. Die Luft bekommt dabei vom Flugzeug positiven Impuls, d. h., der Impuls des

Flugzeugs nimmt ab. (Wir haben angenommen, das Flugzeug fährt nach rechts.)

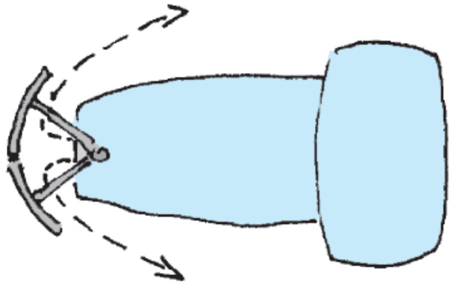


Abb. 3.27 Strahltriebwerk, bei dem gerade die Schubumkehr arbeitet: Das Flugzeug gibt Impuls an die Luft ab.

Aufgaben

1. Woher bekommt ein Segelschiff seinen Impuls?
2. Ein Schiff fährt mit konstanter Geschwindigkeit, d. h., sein Impulsinhalt ändert sich nicht. Wo bleibt der Impuls, den der Motor ständig ins Schiff pumpt?

3.6 Fließgleichgewichte

Ein Auto beschleunigt: Der Motor pumpt Impuls aus der Erde ins Auto hinein. Je schneller das Auto fährt, desto größer wird aber die Luftreibung, desto mehr Impuls verliert es. Bei einer bestimmten Geschwindigkeit wird schließlich gerade so viel Impuls ins Auto hineingepumpt wie durch die Reibung wieder abfließt. Netto bleibt also nichts übrig, der Impuls des Autos nimmt nicht weiter zu, Abb. 3.28.

Diese Situation liegt immer vor, wenn ein Auto auf ebener Strecke mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Der Zustrom von Impuls ist gleich dem Wegstrom. Die Situation lässt sich mit einer anderen vergleichen, bei der Wasser die Rolle des Impulses übernimmt, Abb. 3.29. Der Eimer mit dem Loch entspricht dem Auto. Der Eimer hat ein Leck für das Wasser, so wie das Auto ein Impulsleck hat. In den Eimer fließt ständig neues Wasser nach, aber genauso viel Wasser fließt durch das Loch wieder heraus, sodass sich die Wassermenge im Eimer nicht ändert.

Einen solchen Vorgang, bei dem sich der wegfließende Strom so einstellt, dass er genauso stark ist wie der zufließende, nennt man Fließgleichgewicht.

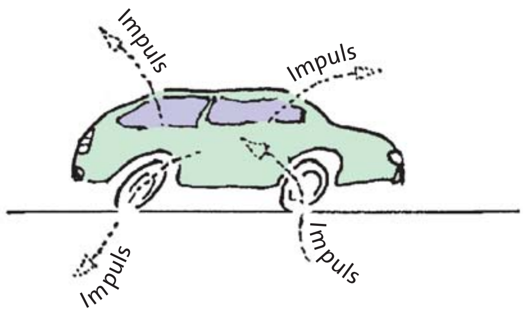


Abb. 3.28 Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Der ganze Impuls, den der Motor ins Auto pumpt, fließt wegen der Reibung wieder in die Umgebung ab.

Abb. 3.29 Durch das Loch fließt genauso viel Wasser ab, wie aus dem Wasserhahn zufließt. Die Wassermenge im Eimer bleibt konstant.

> Fließgleichgewicht: Der Wegstrom stellt sich so ein, dass er gleich dem Zustrom ist.

Ein Fließgleichgewicht liegt häufig vor, wenn sich etwas mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. So pumpt ein Radfahrer durch das Treten Impuls ins Fahrrad (+ Person). Ein gleich starker Strom fließt wegen der Reibung über Luft und Räder ab. Entsprechendes gilt für Flugzeuge und Schiffe.

Aufgaben

1. Beschreibe die folgenden Fahrzustände eines Autos, indem du angibst, was mit dem Impuls geschieht.
   (a) Das Auto fährt an.
   (b) Das Auto rollt langsam im Leerlauf.
   (c) Das Auto bremst.
   (d) Das Auto fährt mit hoher, konstanter Geschwindigkeit.
2. Wir hatten früher einen Vorgang kennen gelernt, bei dem sich ein Körper mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, obwohl kein Fließgleichgewicht vorliegt. Warum blieb dort der Impuls konstant?

3.7 Die Richtung von Impulsströmen

Das folgende Experiment können wir nur in Gedanken machen, denn man braucht dafür einen fahrenden Zug.

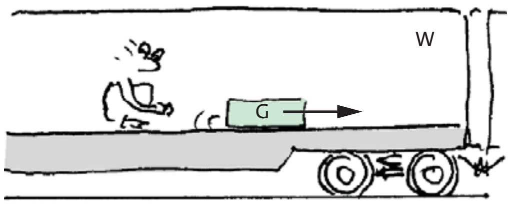


Abb. 3.30 In einem Eisenbahnwagen rutscht ein Gegenstand über den Boden.

In einem nach rechts fahrenden Eisenbahnwagen W, Abb. 3.30, wird ein Gegenstand G auf den Boden geworfen, und zwar so, dass er über den Boden nach rechts rutscht. Die Geschwindigkeit von G ist also unmittelbar nach dem Auftreffen auf dem Boden größer als die des Zuges. Der Gegenstand kommt aber schnell zum „Stillstand“. Mit Stillstand meinen wir hier, dass er sich relativ zum Zug nicht mehr bewegt. Oder anders ausgedrückt: Er bewegt sich jetzt genauso schnell wie der Eisenbahnwagen. Während des Rutschens hat der Impuls von G abgenommen, es ist Impuls von G nach W geflossen.

Wir werfen nun G noch einmal auf den Boden, aber diesmal so, dass er nach links gleitet. Jetzt ist seine Geschwindigkeit zunächst kleiner als die des Zuges. Wieder gleichen sich aber beide Geschwindigkeiten schnell an. Diesmal nimmt der Impuls von G während des Rutschens zu. Es fließt also Impuls vom Wagen W in den Gegenstand G.

Hast du bemerkt, dass für die Richtung, in die der Impulsstrom fließt, eine einfache Regel gilt? Der Impuls fließt in beiden Fällen vom Körper mit der höheren Geschwindigkeit zum Körper mit der niedrigeren Geschwindigkeit: im ersten Fall von G nach W und im zweiten von W nach G. Diese Regel gilt immer, wenn ein Impulsstrom aufgrund von Reibung fließt. Auch bei dem ausrollenden Auto, Abb. 3.31, fließt der Impuls vom Körper mit der höheren Geschwindigkeit (vom Auto) in den Körper mit der niedrigeren (in die Erde, die ja die Geschwindigkeit 0 km/h hat).

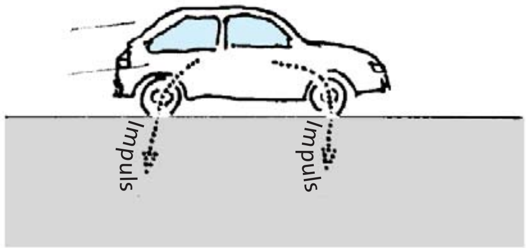


Abb. 3.31 Ausrollendes Auto. Der Impuls fließt vom Körper hoher in den Körper niedriger Geschwindigkeit.

Immer wenn der Impuls in die entgegengesetzte Richtung fließen soll, also vom Körper mit der niedrigen zum Körper mit der hohen Geschwindigkeit, braucht man eine Impulspumpe.

Wir haben damit die Regel:

> Der Impuls fließt von selbst von einem Körper hoher zu einem Körper niedriger Geschwindigkeit. Eine „Impulspumpe“ (Motor, Mensch) befördert ihn in die entgegengesetzte Richtung.

3.8 Druck- und Zugspannung

In Abb. 3.32a setzt jemand einen Wagen in Bewegung. Durch die Stange fließt Impuls von links nach rechts. In Abb. 3.32b rollt der Wagen von allein weiter. Sein Impuls ändert sich nicht mehr

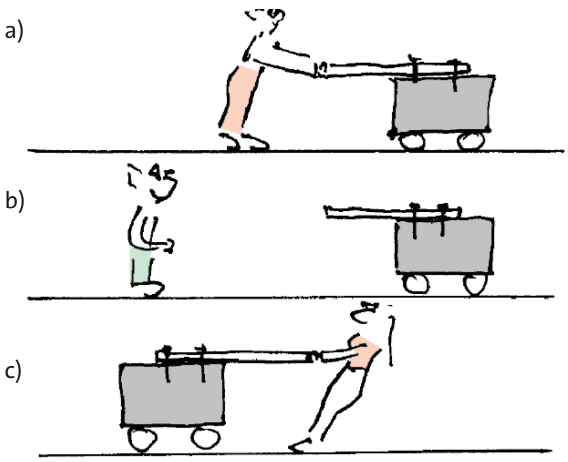


Abb. 3.32 (a) In der Stange fließt Impuls nach rechts. (b) In der Stange fließt kein Impuls. (c) In der Stange fließt Impuls nach links.

(von Reibungsverlusten abgesehen). Durch die Stange in Abb. 3.32b fließt daher kein Impuls. In Abb. 3.32c fließt Impuls durch eine Stange von rechts nach links. Versetze dich nun einmal in die Lage der Stange. Würdest du in den drei Fällen einen Unterschied spüren? Natürlich. Schließlich kann man einfach die Arme der Person als Verlängerung der Stange auffassen, und mit den Armen nimmt die Person in den drei Fällen einen Unterschied wahr. Im ersten Fall spürt sie eine Druckspannung, im dritten eine Zugspannung, und im zweiten weder Druck noch Zug.

Man kann diese Aussagen auf die Stange übertragen. Im ersten Fall steht die Stange unter Druckspannung, im zweiten ist sie entspannt, und im dritten steht sie unter Zugspannung. Wir haben also die folgende Regel:

> Impulsstrom nach rechts: Druckspannung
> Impulsstrom nach links: Zugspannung

Wir wollen uns in einem weiteren Beispiel von der Gültigkeit dieser Regel überzeugen. Abb. 3.33a zeigt einen Lastzug, der gerade anfährt. Der LKW-Motor pumpt Impuls aus der Erde in den LKW und über die Anhängerkupplung nach links in den Anhänger. Wir wissen, dass die Kupplungsstange unter Zugspannung steht – in Übereinstimmung mit unserer Regel.

a)
b)

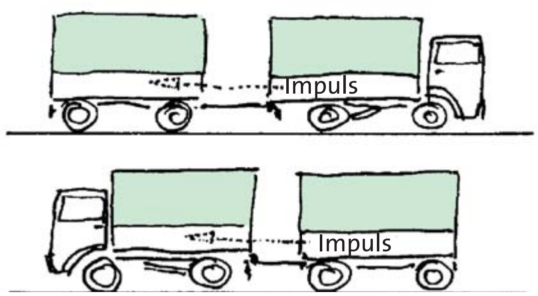


Abb. 3.33 Ein Lastzug fährt (a) nach rechts und (b) nach links an. Beide Male steht die Kupplungsstange unter Zugspannung, und beide Male fließt ein Impulsstrom nach links.

Wir betrachten nun einen Lastzug, der nach links anfährt, Abb. 3.33b. Hier pumpt der Motor negativen Impuls in den Lastzug hinein, d. h. positiven Impuls aus ihm heraus. Daher fließt (positiver) Impuls durch die Kupplungsstange nach links. Die Kupplungsstange steht natürlich wieder unter Zugspannung. Auch hier gilt also unsere Regel.

Einer Stange sieht man es nicht an, ob sie unter Druck- oder Zugspannung oder unter gar keiner Spannung steht, d. h., man sieht ihr nicht an, ob und in welche Richtung ein Impulsstrom in ihr fließt. Es gibt aber Gegenstände, denen man ihren Spannungszustand sehr gut ansieht: alle elastisch verformbaren Gegenstände, z. B. Gummibänder oder Stahlfedern.

Solche Gegenstände sind verlängert, wenn sie unter Zugspannung und verkürzt, wenn sie unter Druckspannung stehen. Man sieht ihnen also an, ob und in welche Richtung ein Impulsstrom durch sie fließt, Abb. 3.34 und Abb. 3.35. Wir fassen zusammen:

> Verlängerung: Zugspannung,
> Impulsstrom nach links
> Verkürzung: Druckspannung,
> Impulsstrom nach rechts

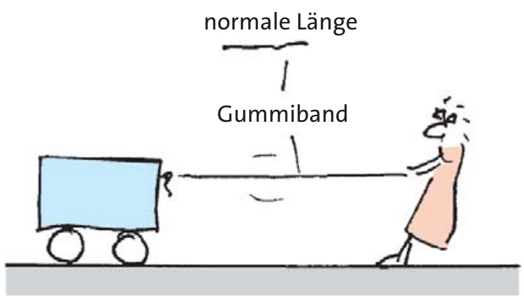


Abb. 3.34 Durch das Gummiseil fließt ein Impulsstrom nach links. Das Seil steht unter Zugspannung. Es hat sich verlängert.

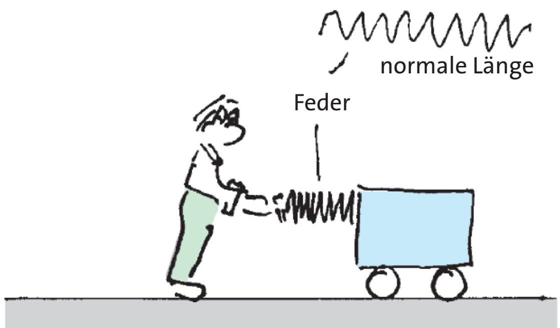


Abb. 3.35 Durch die Feder fließt ein Impulsstrom nach rechts. Die Feder hat sich verkürzt.

Aufgaben

1. Ein Auto, das nach links fährt, bremst plötzlich. Von wo nach wo fließt der Impuls? Wird hier die Regel befolgt, nach der der Impuls von selbst vom Körper hoher zum Körper niedriger Geschwindigkeit fließt?
2. Lilly beschleunigt einen Wagen nach links, und zwar indem sie schiebt. Dabei herrscht in ihren Armen eine Druckspannung. In welche Richtung fließt der Impulsstrom in den Armen?
3. Ein Lastzug fährt mit konstanter, hoher Geschwindigkeit nach rechts. Unter was für einer Spannung (Druck oder Zug) steht die Anhängerkupplung? Skizziere den Weg des Impulses.

3.9 Impulsstromkreise

Es kann sein, dass irgendwo ein Impulsstrom fließt und sich trotzdem nirgends eine Impulsmenge ändert. Abb. 3.36 zeigt ein Beispiel: Lilly zieht eine Kiste mit gleich bleibender Geschwindigkeit über den Boden.

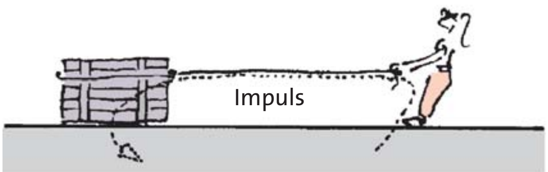


Abb. 3.36 Obwohl ein Impulsstrom fließt, häuft sich nirgends Impuls an.

Statt der Kiste könnte Lilly mit konstanter Geschwindigkeit einen Wagen ziehen. Für unsere Betrachtungen hat die Kiste den Vorteil, dass man sehr gut sieht, an welcher Stelle die Reibung stattfindet: an der Berührungsfläche zwischen Kiste und Boden. Bei Rädern gibt es Reibung nicht nur in den Lagern, sondern auch in den Gummireifen und an der Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden.

Wir stellen wieder unsere alte Frage: Welchen Weg nimmt der Impuls? Die Antwort fällt dir hoffentlich nicht schwer. Lilly pumpt Impuls aus der Erde über das Seil in die Kiste. Aus der Kiste fließt er, wegen der Reibung zwischen Kistenunterseite und Erdboden, in die Erde zurück. Wir können hier also sagen, der Impuls fließt „im Kreis herum", auch wenn wir den genauen Rückweg durch die Erde nicht kennen.

Wieder lässt sich die Situation mit einem Wasserstrom veranschaulichen. Weißt du wie?

Abb. 3.37 zeigt eine Abwandlung des Experiments von Abb. 3.36: Willy zieht die Kiste hier nicht über den Erdboden, sondern über ein auf

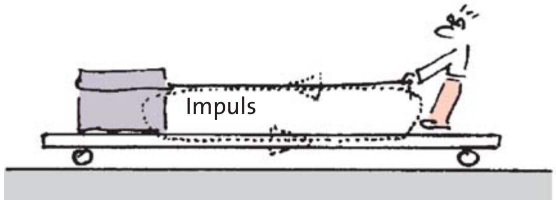


Abb. 3.37 Geschlossener Impulsstromkreis

Rollen gelagertes Brett. Der Weg des Impulses ist in diesem Fall noch einfacher. Da das Brett auf Rollen liegt, kann der Impuls nicht in die Erde abfließen, und Willy kann keinen Impuls aus der Erde herauspumpen. Er pumpt also Impuls zunächst aus dem Brett heraus, der Impuls fließt weiter durch das Seil in die Kiste, und aus der Kiste fließt er zurück ins Brett. Im Brett fließt er dann weiter nach rechts bis zu Willy. Der Impuls geht hier also wieder in einem geschlossenen „Kreis" herum. Und diesmal ist der Weg überall klar erkennbar. Man sagt, der Impulsstrom bilde einen Stromkreis.

Dass der Impuls im Seil wirklich nach links und im Brett nach rechts fließt, erkennt man in einer weiteren Variante des Experiments, Abb. 3.38.

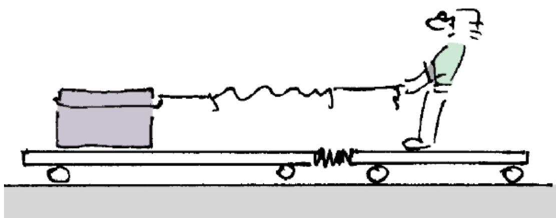


Abb. 3.38 Die Federn zeigen die Richtung des Impulsstroms an.

Das Seil und das Brett sind durch je eine Feder unterbrochen. Die Federn zeigen uns an, in welche Richtung der Impulsstrom fließt. Die Feder im Seil ist gedehnt, sie steht also unter Zugspannung, was bedeutet, dass der Impuls nach links fließt. Die Feder zwischen den beiden Bretthälften ist gestaucht, sie steht also unter Druckspannung, was bedeutet, dass hier der Impuls nach rechts fließt.

> Impuls kann in einem geschlossenen Stromkreis fließen. Der Impuls nimmt dann an keiner Stelle zu oder ab. Ein Teil jedes Impulsstromkreises steht unter Druckspannung, ein anderer unter Zugspannung.

Wir ändern nun das Experiment noch einmal ab, und zwar in zwei Schritten. Zunächst blockieren wir die Kiste, Abb. 3.39. Willy zieht wieder, die Kiste kann sich aber nicht mehr bewegen.

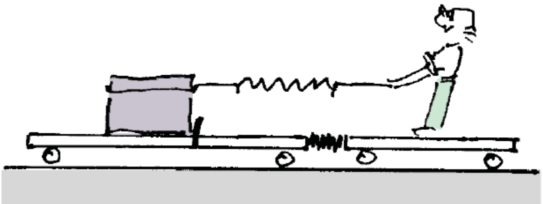


Abb. 3.39 Die Kiste bewegt sich nicht. Trotzdem fließt ein Impulsstrom.

Wir stellen fest, dass wir jetzt Willy eigentlich gar nicht mehr brauchen: Es genügt, das gespannte Seil rechts irgendwie zu befestigen, Abb. 3.40. Das Seil steht nach wie vor unter Zugspannung, das Brett unter Druckspannung. Das bedeutet, dass der Impulsstrom nach wie vor im Kreis herum fließt – und das, obwohl sich nichts mehr bewegt, ja sogar obwohl wir gar keine „Impulspumpe“ mehr haben.

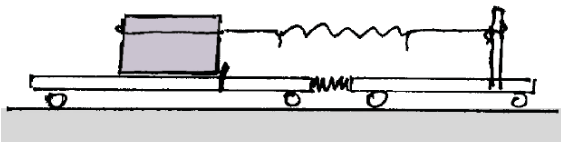


Abb. 3.40 Impulsstrom ohne Antrieb

Dass etwas ohne Antrieb strömt, wird dich überraschen. Schließlich hatten wir in Kapitel 2 festgestellt, dass man einen Antrieb braucht, wenn man einen Strom fließen lassen möchte. Wir sehen nun, dass diese Regel nicht immer gilt. Es gibt Ströme ohne Antrieb. Dass man keinen Antrieb braucht, bedeutet natürlich nichts anderes, als dass dem Strom kein Widerstand entgegensteht.

Du wirst später sehen, dass auch elektrische Ströme in der Regel einen Antrieb brauchen, dass es aber auch elektrische Leiter gibt, die keinen Widerstand haben, die Supraleiter. In einem elektrischen Stromkreis aus supraleitendem Material kann ein elektrischer Strom ohne Antrieb fließen.

Widerstandslose elektrische Stromkreise sind selten, widerstandslose Impulsstromkreise dagegen häufig. Abb. 3.41 und Abb. 3.42 zeigen zwei Beispiele.

Abb. 3.41 Geschlossener Impulsstromkreis

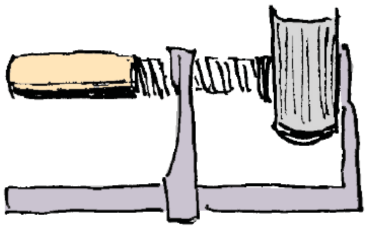
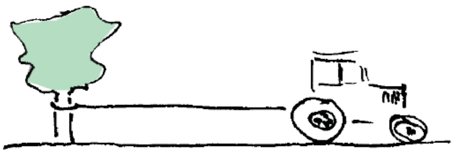


Abb. 3.42 Geschlossener Impulsstromkreis

Aufgaben

1. In Abb. 3.43a wird versucht, mit einem Traktor einen Baum auszureißen. Skizziere den Verlauf des Impulsstroms.
2. Abb. 3.43b zeigt eine gespannte Wäscheleine. Skizziere den Verlauf des Impulsstroms. Wo herrscht Zug-, wo Druckspannung?
3. Wie kann man einen widerstandslosen Materiestrom realisieren? Gibt es so etwas in der Natur?

a)



b)

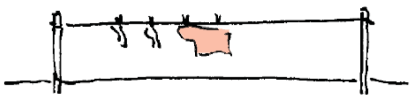


Abb. 3.43 Zu den Aufgaben 1 und 2

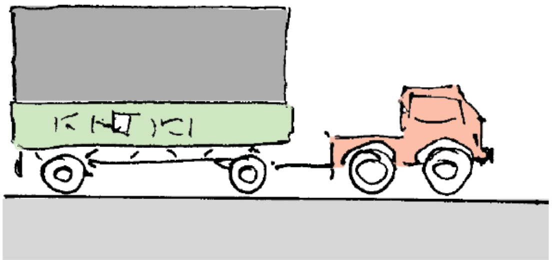


Abb. 3.44 Von der Zugmaschine zum Anhänger fließt ein zeitlich konstanter Impulsstrom.

3.10 Die Impulsstromstärke

Von der Zugmaschine in Abb. 3.44 fließt ein zeitlich konstanter Impulsstrom in den Anhänger: Es fließt eine bestimmte Zahl von Huygens pro Sekunde durch die Kupplungsstange. Wir nennen die Impulsmenge, die durch eine Leitung fließt, dividiert durch die Zeitspanne die Impulsstromstärke.

$$\text{Impulsstromstärke} = \frac{\text{Impuls}}{\text{Zeit}}$$

Diese Gleichung lässt sich viel kürzer schreiben, wenn man für die Größen ihre Symbole setzt:

p = Impuls
F = Impulsstromstärke
t = Zeit

Wir haben also:

$$F = \frac{p}{t}.$$

Fließen durch die Anhängerkupplung von Abb. 3.44 zum Beispiel in jeder Sekunde 500 Hy, so ist

$$F = 500\,\text{Hy/s}.$$

Für die Maßeinheit Hy/s benutzt man die Abkürzung Newton (N):

$$\text{N} = \frac{\text{Hy}}{\text{s}}.$$

Damit können wir die Impulsstromstärke schreiben:

$$F = 500\,\text{N}.$$

Die Maßeinheit der Impulsstromstärke wurde nach Isaac Newton (1643 — 1727) benannt. Newton brachte die Mechanik im Wesentlichen in die Form, in der wir sie noch heute lernen. Unter anderem geht die Gleichung $F = p/t$ auf Newton zurück.

Impulsstromstärken lassen sich sehr leicht messen, und zwar mit einem sogenannten Kraftmesser, Abb. 3.45. Ein Kraftmesser besteht im Wesentlichen aus einer Stahlfeder, die sich umso mehr verlängert, je stärker der Impulsstrom ist, der durch sie hindurchfließt. Die Skala ist in Newton geeicht.

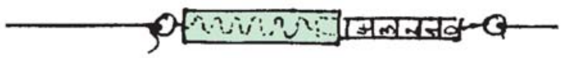


Abb. 3.45 Kraftmesser

a)
b)

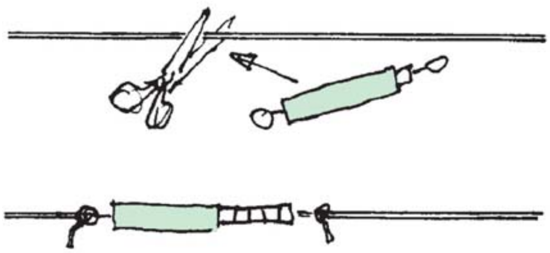


Abb. 3.46 (a) Die Stärke des Impulsstroms in einem Seil soll gemessen werden. (b) Man trennt das Seil durch und hängt den Kraftmesser an die neu entstandenen Enden.

Wie man mit einem Kraftmesser umgeht, zeigt Abb. 3.46. Die Stärke des Impulsstroms, der durch das Seil in Abb. 3.46a fließt, soll gemessen werden. Man trennt das Seil an einer beliebigen Stelle durch und verbindet die beiden neu entstandenen Enden mit den beiden Haken des Kraftmessers, Abb. 3.46b.

In Abb. 3.47a wird die Stärke ein und desselben Impulsstroms zweimal nacheinander gemessen. Beide Kraftmesser zeigen natürlich dasselbe an, und sie zeigen genauso viel an, wie ein einziger Kraftmesser anzeigen würde.

Wie bei Wasserströmen gibt es auch für Impulsströme Verzweigungen. Abb. 3.47b zeigt ein Beispiel. Hier muss die Summe der Stromstärken in den Seilen A und B gleich der Stromstärke in

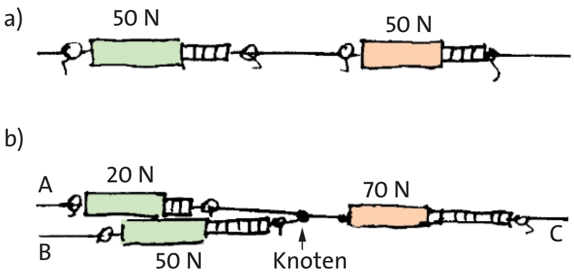


Abb. 3.47 (a) Ein Strom fließt nacheinander durch zwei Messgeräte. (b) Verzweigter Impulsstrom

Seil C sein. Wir haben die Knotenregel angewendet, die du schon von den Wasserströmen her kennst (siehe Abschnitt 2.5):

> Die zu einem Knoten hinfließenden Ströme sind zusammen genauso stark wie die wegfließenden.

Aufgaben

1. In einen gut gelagerten Wagen fließt ein Impulsstrom konstanter Stärke hinein. In 10 Sekunden hat sich eine Impulsmenge von 200 Huygens angesammelt. Wie groß war die Stromstärke?
2. Beim Anfahren eines Lastzuges fließt durch die Anhängerkupplung ein Impulsstrom von 6000 N. Welchen Impuls hat der Anhänger nach 5 s? (Die Reibungsverluste des Anhängers seien vernachlässigbar.)
3. Was zeigen die Kraftmesser C und D in Abb. 3.48a an?
4. Die Kisten in Abb. 3.48b werden mit konstanter Geschwindigkeit über den Boden gezogen. Wie stark ist der Impulsstrom, der von der linken Kiste in die Erd
5. In ein Fahrzeug, dessen Reibung vernachlässigbar ist, fließt ein konstanter Impulsstrom von 40 N hinein. Stelle den Impuls als Funktion der Zeit grafisch dar.

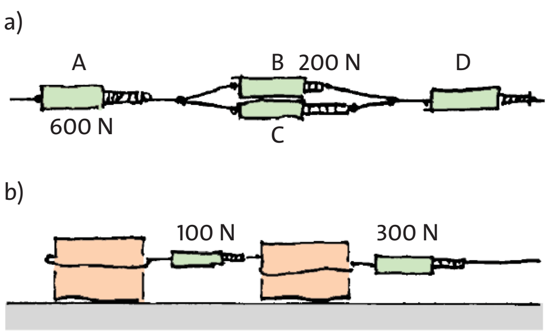


Abb. 3.48 (a) zu Aufgabe 3, (b) zu Aufgabe 4

3.11 Die Kraft

In diesem Abschnitt geht es nur darum, ein neues Wort für einen bekannten Begriff kennen zu lernen.

Den Namen Impulsstromstärke für die Größe *F* gibt es erst seit Anfang des vorigen Jahrhunderts. Die Größe selbst aber gibt es schon seit Newtons Zeit, d. h. seit etwa 300 Jahren. Man gab aber der Größe damals einen anderen Namen: Man nannte sie Kraft. Das *F* ist der erste Buchstabe von „force“, dem englischen Wort für Kraft. Der Name Kraft für die Größe *F* ist heute noch weit verbreitet, ja er wird sogar viel häufiger gebraucht als der Name Impulsstromstärke. Wir müssen uns daher an seinen Gebrauch gewöhnen. Dabei gibt es allerdings ein Problem: Obwohl „Kraft“ dieselbe physikalische Größe bezeichnet wie „Impulsstromstärke“, geht man mit den beiden Wörtern ganz unterschiedlich um. Wir wollen eine Beschreibung mit Impulsströmen das Impulsstrommodell nennen und eine mit Kräften das Kraftmodell.

Du verstehst übrigens schon jetzt, warum unser Impulsstrommessgerät „Kraftmesser“ heißt.

Wir wollen den Umgang mit dem Kraftmodell anhand von Abb. 3.49 und Abb. 3.50 kennenlernen. In Abb. 3.49 zieht Lilly an einem gut gelagerten Wagen, sodass sich dieser nach rechts in Bewegung setzt. Zunächst noch einmal, zur Erinnerung, die Beschreibung im Impulsstrommodell: Lilly pumpt Impuls aus der Erde über das Seil in den Wagen. Dadurch nimmt der Impuls des Wagens zu. Mit dem Kraftmodell beschreibt man denselben Vorgang so: Auf den Wagen „wirkt eine Kraft“, oder „Lilly übt auf den Wagen eine Kraft aus“. Dadurch nimmt der Impuls des Wagens zu.

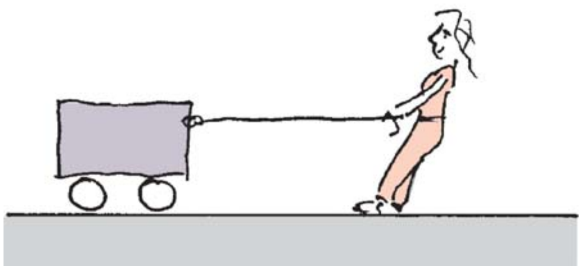


Abb. 3.49 Lilly übt auf den Wagen eine Kraft aus. Dadurch ändert sich der Impuls des Wagens.

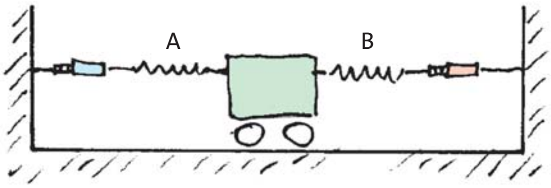


Abb. 3.50 Feder A übt auf den Wagen eine nach links gerichtete, Feder B eine nach rechts gerichtete Kraft aus. Da die Kräfte vom selben Betrag sind, ändert sich der Impuls des Wagens nicht.

a)
b)

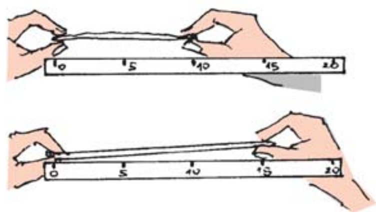


Abb. 3.51 Zur Festlegung einer Impulsstromstärkeeinheit. (a) Der Gummiring ist gestreckt, aber entspannt. (b) Der Gummiring wurde um 5 cm verlängert.

Etwas schwieriger ist die Beschreibung von Abb. 3.50. Hier ziehen an einem Wagen zwei Federn A und B, Feder A zieht nach links, Feder B nach rechts. Die beiden Kraftmesser zeigen selbstverständlich dasselbe an; nehmen wir an, es seien 50 N. Auch hier zunächst die Beschreibung im Impulsstrommodell: Von der Erde fließt ein Impulsstrom von 50 N durch Feder B von rechts her in den Wagen hinein und von dort über Feder A wieder zurück in die Erde. Im Kraftmodell sieht die Beschreibung so aus: Feder A übt auf den Wagen eine nach links gerichtete Kraft von 50 N aus, Feder B übt auf den Wagen eine nach rechts gerichtete Kraft desselben Betrages, d. h. ebenfalls von 50 N, aus. Da die Kräfte vom gleichen Betrag sind, aber in die entgegengesetzte Richtung wirken, ändert sich der Impuls des Wagens nicht.

3.12 Die Messung der Impulsstromstärke

Wir wollen ein Impulsstrommessgerät (einen Kraftmesser) selbst bauen. Wir tun so, als wäre der Federkraftmesser noch nicht erfunden, und als sei die Maßeinheit der Impulsstromstärke noch nicht festgelegt worden.

Wir beginnen damit, unsere eigene Maßeinheit festzulegen. Wir brauchen dazu eine größere Zahl völlig gleichartiger Gummiringe. Wir halten einen davon so vor ein Lineal, dass er zwar völlig lang gestreckt, aber noch nicht über seine Normallänge hinaus gespannt ist, Abb. 3.51, und messen seine Länge. Nehmen wir an, wir finden 10 cm = 0,1 m. Da der Gummiring entspannt ist, fließt bisher noch kein Impulsstrom hindurch. Wir ziehen den Ring nun in die Länge, und zwar bis er 0,15 m lang ist. Jetzt fließt ein Impulsstrom. Die Stärke dieses Impulsstroms erklären wir zu unserer Stromstärkeeinheit. (Da der Ring aus zwei nebeneinander liegenden Gummifäden besteht, fließt in jedem dieser Fäden eine halbe Stromstärkeeinheit.)

Wir können nun mit anderen Gummiringen so viele Stromstärkeeinheiten erzeugen, wie wir wollen. Und das heißt, dass wir Vielfache unserer Stromstärkeeinheit herstellen können. Hängen wir zum Beispiel drei Einheitsgummiringe nebeneinander, so fließen durch alle drei zusammen drei Stromstärkeeinheiten.

Mithilfe unseres Vorrats an Gummiringen können wir auch einen anderen elastisch dehnbaren Gegenstand eichen, z. B. ein Expandergummiseil, Abb. 3.52. Wir lassen dazu eine, zwei, drei usw. Stromstärkeeinheiten durch das Expanderseil fließen und messen jeweils die Veränderung s seiner Länge im Vergleich zur Länge im entspannten Zustand.

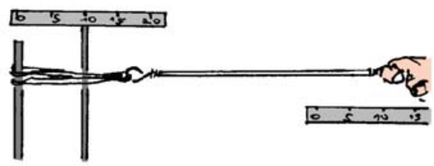


Abb. 3.52 Das Seil eines Expanders wird mithilfe von Gummiring-Einheiten geeicht.

In Abb. 3.53 ist die Impulsstromstärke über der „Verlängerung“ aufgetragen. Diese Kurve stellt die Eichkurve des Expandergummis dar. Wenn wir jetzt eine Impulsstromstärke messen wollen, können wir auf unser etwas umständliches Verfahren mit den Einheitsgummiringen verzichten und stattdessen das Expanderseil benutzen.

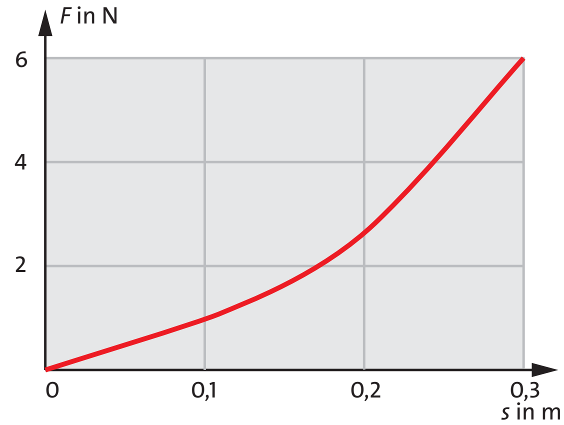


Abb. 3.53 Eichkurve des Expanderseils: Die Impulsstromstärke ist über der Verlängerung *s* des Seils aufgetragen.

Es soll z. B. die Stärke des Stroms gemessen werden, der in einen Wagen hineinfließt, an dem wir ziehen. Wir ziehen dazu an dem Wagen einfach über das Expanderseil und messen, um wie viel es sich verlängert. Beträgt die Verlängerung zum Beispiel 0,25 m, so entnehmen wir der Eichkurve, dass der Impulsstrom eine Stärke von 4 Einheiten hat.

Wir wollen nun den Zusammenhang zwischen Verlängerung und Impulsstromstärke für

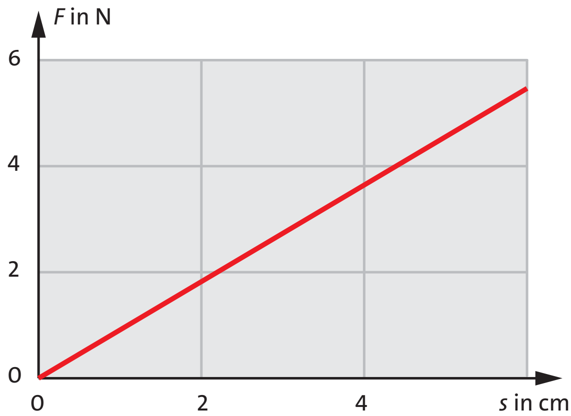


Abb. 3.54 Bei einer Stahlfeder ist der Zusammenhang zwischen Impulsstromstärke und Verlängerung linear.

einen anderen Gegenstand aufnehmen: für eine Stahlfeder. Das Ergebnis zeigt Abb. 3.54. Der Zusammenhang ist hier einfacher als beim Expanderseil: Er ist linear. Verlängerung *s* und Impulsstromstärke *F* sind bei der Feder proportional zueinander. Man sagt, die Feder befolge das Hooke'sche Gesetz. Als Formel lässt es sich so formulieren:

$$F = D \cdot s$$

D ist für eine gegebene Feder eine Konstante. Man nennt *D* die Federkonstante. Ihre Maßeinheit ist N/m. Für verschiedene Federn hat die Federkonstante im Allgemeinen verschiedene Werte. Abb. 3.55 zeigt den Zusammenhang zwischen *F* und *s* für zwei verschiedene Federn. Für Feder A hat *D* einen größeren Wert als für Feder B. Wenn man Feder A und Feder B um denselben Betrag dehnt, so ist der Impulsstrom in Feder A größer als in Feder B. Die Feder mit der größeren Federkonstante fühlt sich daher „härter" an. Also: Je größer die Federkonstante, desto härter die Feder.

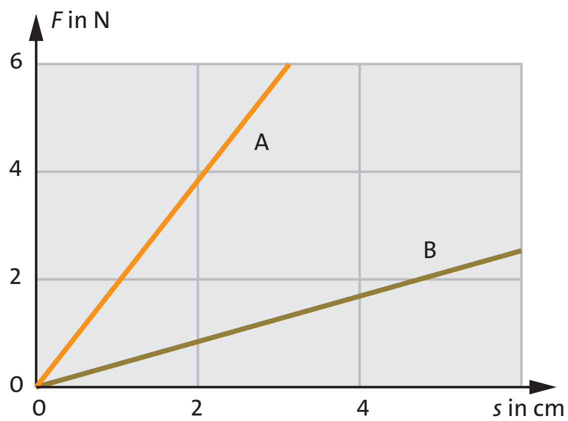


Abb. 3.55 Die Federkonstante von Feder A ist größer als die von Feder B. Feder A ist härter als Feder B.

Viele Federn lassen sich nicht nur auf Zug, sondern auch auf Druck beanspruchen. Für solche Federn gilt das Hooke'sche Gesetz, d. h. der lineare Zusammenhang zwischen Längenänderung und Stromstärke, sowohl für Verlängerung (positive Werte von *s*) als auch für Verkürzung (negative Werte von *s*).

Aufgaben

1. Eine Feder habe eine Federkonstante von $D = 150$ N/m. Um wie viel verlängert sie sich, wenn ein Impulsstrom von
   a) 12 N b) 24 N
   durch sie fließt.
2. Für ein bestimmtes Seil wurde der in Abb. 3.56 dargestellte *F*-*s*-Zusammenhang gemessen.
   a) Um wie viel verlängert sich das Seil, wenn ein Impulsstrom von 15 N hindurchfließt? Um wie viel verlängert es sich bei einer Stromstärke von 30 N?
   b) Wie stark ist der Impulsstrom, wenn sich das Seil um 20 cm verlängert hat?
   c) Was spürt man, wenn man das Seil mit den Händen auseinander zieht? Vergleiche mit einer Stahlfeder.
3. Wie könnte man eine Anordnung bauen, deren *F*-*s*-Zusammenhang wie der in Abb. 3.57 aussieht?
4. Zwei Federn werden aneinander gehängt und in ein Seil eingebaut, durch das ein Impulsstrom fließt. Die eine Feder verlängert sich viermal so stark wie die andere. Wie verhalten sich die Federkonstanten zueinander?

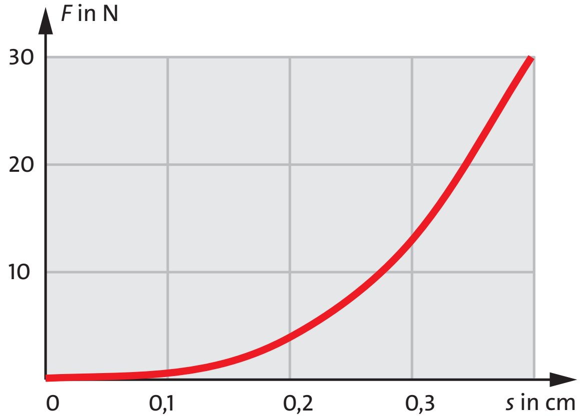


Abb. 3.56 Zu Aufgabe 2

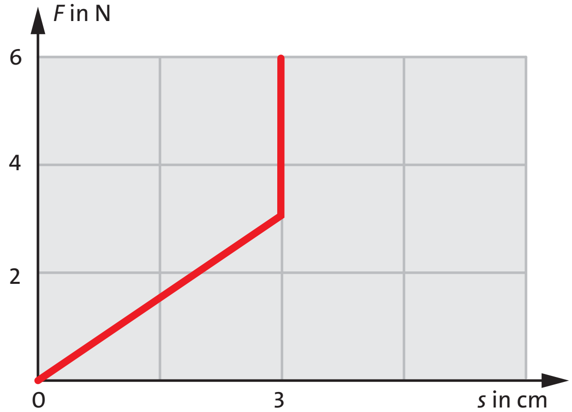


Abb. 3.57 Zu Aufgabe 3

3.13 Impulsströme können zerstören

Wird ein Impulsstrom zu groß, so kann die Leitung, durch die er fließt, reißen, Abb. 3.58. Oft möchte man das vermeiden. Manchmal möchte man aber auch absichtlich etwas zerreißen, zerbrechen oder zerkleinern. Wir wollen für beide Fälle Beispiele diskutieren.

Abschleppen eines Autos

Das Abschleppseil ist beim Anfahren gerissen, Abb. 3.58. Wie hätte man das vermeiden können? Versuche, einen schweren Wagen auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu bringen, indem du mithilfe eines dünnen Fadens an ihm ziehst. Ziehst du sehr stark, d. h., lässt du einen sehr starken Impulsstrom fließen, so reißt der Faden. Trotzdem kann man den Wagen mit der gewünschten Impulsmenge laden. Man muss einen Impulsstrom fließen lassen, der genügend schwach ist, dafür aber eine längere Zeit fließt. In anderen Worten: Man muss weniger kräftig, dafür aber eine längere Zeit ziehen. Für das Abschleppen des Autos bedeutet das: Man muss vorsichtig anfahren, damit der Impulsstrom im Abschleppseil nicht zu stark wird.

Abb. 3.58 Wird der Impulsstrom sehr groß, so kann die Leitung reißen.

Fangen eines Steins

Ein Stein, der auf eine Fensterscheibe trifft, gibt seinen Impuls in sehr kurzer Zeit an die Scheibe ab. Die Stromstärke ist dabei sehr hoch. Die Folge: Die Scheibe geht kaputt. Fängt man den Stein dagegen mit den Händen, so folgt man der Bewegung des Steins während des Abbremsens etwas. Dadurch wird die Zeitspanne, in der der Impuls aus dem Stein herausfließt, verlängert und die

Impulsstromstärke vermindert. Es entsteht kein Schaden.

Der Hammer

Manchmal möchte man absichtlich etwas zerstören, etwa einen Ziegelstein. Man kann dazu einen Hammer benutzen. Der Hammer wird zunächst relativ langsam mit Impuls geladen, indem man ihn mit der Hand in Bewegung setzt. Trifft er dann auf den Ziegelstein, so fließt sein Impuls in kurzer Zeit ab. Die Impulsstromstärke ist dabei sehr hoch, und der Stein zerbricht.

Ob ein Impulsstrom etwas zerstört oder nicht, hängt aber nicht nur von seiner Stärke ab. Es ist klar, dass man das Reißen des Seils beim Abschleppen in Abb. 3.58 noch auf andere Art vermeiden kann: indem man ein dickeres Seil nimmt. Man sieht daran: Wichtig für das Zerreißen ist nicht einfach ein starker Impulsstrom, sondern vielmehr ein starker Strom, der durch eine kleine Querschnittsfläche fließt. Seil A in Abb. 3.59 reißt, wenn ein Strom von 50 N hindurchfließt; Seil B, das die doppelte Querschnittsfläche hat, reißt dagegen nicht. Das ist leicht einzusehen: Wenn Seil A eine Querschnittsfläche von 1 cm^2 und Seil B von 2 cm^2 hat, so kann man sich Seil B vorstellen als zwei parallele Seile von je 1 cm^2 Querschnittsfläche, durch die je nur 25 N fließen, die also geringer belastet sind.

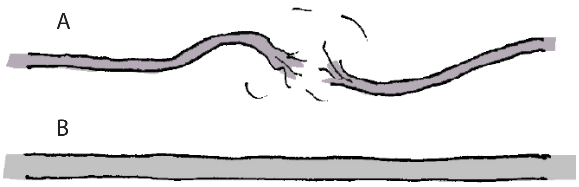


Abb. 3.59 Die Querschnittsfläche von Seil B ist doppelt so groß wie die von A Seil A.

Man kann also die Belastung des Materials einer Leitung dadurch vermindern, dass man die Leitung dicker macht. Auch hierzu wieder einige Beispiele.

Nagel, Reißzwecke, Messer, Meißel

Dies sind Dinge, mit denen man etwas zerstören kann. (Ein Loch in eine Wand zu machen ist eine Art Zerstörung.) In allen Fällen wird ein Impulsstrom durch eine Spitze oder eine andere enge Stelle in das Material geleitet, das bearbeitet werden soll. Die Belastung des Materials wird an dieser Stelle so groß, dass es kaputt geht.

Sicherheitsgurt und Airbag

Bei einem Autounfall kommt das Auto sehr schnell zum Stehen. Es gibt seinen Impuls sehr schnell ab: an einen Baum, eine Leitplanke oder an ein anderes Fahrzeug. Auch die Passagiere haben Impuls, den sie beim Unfall loswerden müssen. Die starken Impulsströme, die dabei fließen, führen zur Zerstörung des Autos und zur Verletzung der Passagiere. Einen Teil der Impulsströme versucht man dadurch zu vermindern, dass man im Fahrzeug die sogenannte Knautschzone vorsieht. Das Fahrzeug faltet sich beim Zusammenstoß etwas zusammen. Dadurch wird der Impulsübertragungsvorgang zeitlich etwas gestreckt und die Impulsströme werden schwächer.
Die Sicherheitsgurte haben mehrere Funktionen.

Zum Einen dehnen sie sich beim Unfall etwas aus. Dadurch wird die Impulsübertragung vom Passagier auf das Fahrzeug zeitlich in die Länge gezogen, die Stromstärke wird kleiner.

Zum Zweiten wird der Impulsstrom, der aus dem Passagier herausfließt, auf eine große Fläche verteilt, denn die Gurte sind recht breit. Damit wird, wie wir gesehen hatten, die zerstörerische Wirkung der Ströme vermindert. Ohne Gurt würden die Passagiere vielleicht gegen irgendwelche spitzen Teile im Autoinnern fliegen.

Schließlich werden mit den Gurten die Impulsströme an Stellen des Körpers des Passagiers abgeleitet, an denen die Verletzungen nicht lebensbedrohend ist. Viel schlimmer wäre es, wenn der Passagier seinen Impuls über den Kopf abgäbe.

Noch günstiger ist die Situation beim Airbag: Die Fläche, über die der Impuls aus den Passagieren abfließt, ist hier noch größer.

Aufgabe

1. Ein Auto soll von einem anderen abgeschleppt werden. Es ist mit einem Impulsstrom von 2000 N zu rechnen. Leider haben die Fahrer kein Abschleppseil dabei. Sie finden schließlich eine große Rolle Bindfaden. Dieser verträgt aber nur einen Impulsstrom von 100 N. Was schlägst du ihnen vor?

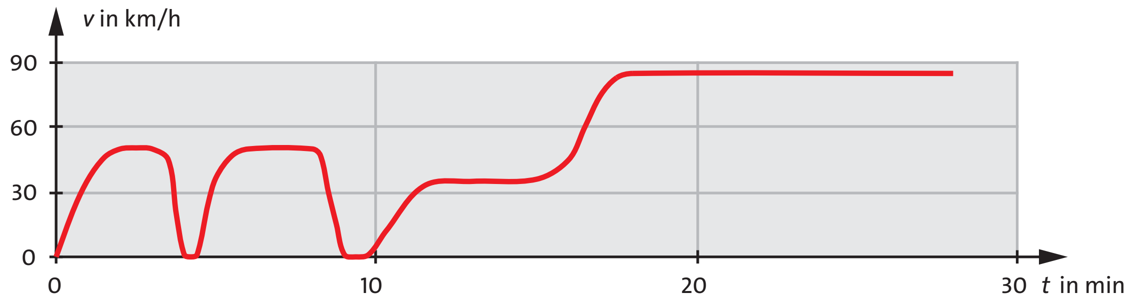


Abb. 3.60 Aufnahme des Fahrtenschreibers eines Lastwagens: Die Geschwindigkeit ist über der Zeit aufgetragen

3.14 Die Geschwindigkeit

Die physikalische Größe, die angibt, wie schnell sich ein Fahrzeug oder sonstiges Gebilde bewegt, heißt Geschwindigkeit, abgekürzt v.

Ein Autofahrer muss immer wissen, wie schnell er fährt, er muss die Geschwindigkeit seines Fahrzeugs kennen. Darum hat jedes Auto ein Messgerät für die Geschwindigkeit: das Tachometer. Es zeigt die Geschwindigkeit in der Maßeinheit Kilometer pro Stunde an, abgekürzt km/h.

Abb. 3.60 zeigt die Aufzeichnung eines Fahrtenschreibers: Die Geschwindigkeit eines Lastwagens wurde automatisch über der Zeit aufgetragen. Wir wollen das Diagramm zu deuten versuchen. Der Lastwagen ist zum Zeitpunkt $t = 0$ Minuten losgefahren. Nach 4 Minuten musste er für kurze Zeit anhalten und nach 9 Minuten noch einmal. Wahrscheinlich standen Verkehrsampeln auf „Rot“. Von der 12. bis zur 16. Minute fuhr er dann recht langsam, mit 35 km/h. Vielleicht ging es bergauf, oder es war dichter Verkehr. Von der 18. Minute an fuhr er schließlich mit hoher, konstanter Geschwindigkeit, mit 85 km/h. Offenbar hatte er jetzt die Stadt verlassen.

Solange sich ein Körper mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, besteht ein einfacher Zusammenhang zwischen seiner Geschwindigkeit, der Wegstrecke und der Zeit, die er zum Zurücklegen der Wegstrecke braucht.

Braucht ein Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit fährt, für 60 km eine halbe Stunde, so braucht es für 90 km 0,75 Stunde, für 120 km 1 Stunde, für 240 km 2 Stunden usw., siehe Tab. 3.5. Die Wegstrecke s ist also zur Zeit t proportional:

s in km	t in h	s/t in km/h
60	0,50	120
90	0,75	120
120	1,00	120
180	1,50	120
240	2,00	120

Tab. 3.5 Zurückgelegte Wegstrecke, Zeit, die zum Zurücklegen des Weges notwendig war, und Quotient aus Weg und Zeit für ein Fahrzeug, das mit konstanter Geschwindigkeit fährt.

$s \sim t.$

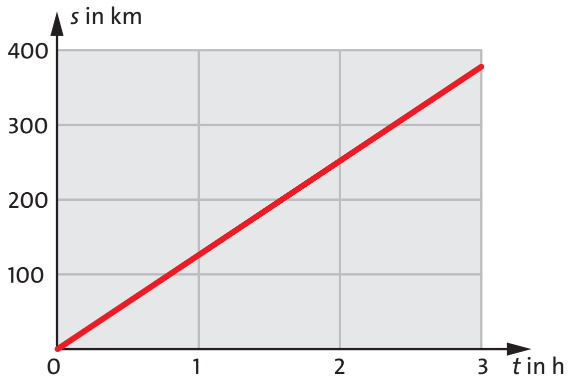


Abb. 3.61 Weg-Zeit-Zusammenhang für ein Auto

In Abb. 3.61 ist der Zusammenhang grafisch dargestellt. Denselben Sachverhalt kann man auch so ausdrücken: Der Quotient s/t ist konstant und dieser Quotient ist gleich der Geschwindigkeit v = 120 km/h.

> Bei konstanter Geschwindigkeit ist $v = \frac{s}{t}$.

Genauso wie verschiedene andere Größen hat auch die Geschwindigkeit mehrere Maßeinheiten. Die Geschwindigkeit von Autos gibt man in km/h an, die von Schiffen in Knoten. Die nach internationaler Vereinbarung in der Physik gebräuchliche Maßeinheit ist Meter pro Sekunde, abgekürzt m/s.

Wir rechnen die Einheit km/h in m/s um:

$$1\frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1\text{ km}}{1\text{ h}} = \frac{1000\text{ m}}{3600\text{ s}} = 0{,}2778\text{ m/s}.$$

Aufgaben

1. Ein Radfahrer braucht 40 Minuten, um eine Strecke von 10 km zu fahren. Mit welcher Geschwindigkeit (in km/h) fährt er?
2. Ein Zug fährt 1 h 32 min lang mit konstanter Geschwindigkeit und legt in dieser Zeit 185 km zurück. Wie groß ist seine Geschwindigkeit? Gib das Ergebnis in km/h und in m/s an.
3. Ein Auto fährt 10 Minuten lang mit 90 km/h. Wie viel km legt es in dieser Zeit zurück?
4. Ein Flugzeug, das mit 800 km/h fliegt, legt einen Weg von 1600 km zurück. Wie lange dauert der Flug?
5. Die Geschwindigkeit des Lichts beträgt 300 000 km/s, die Entfernung zwischen Erde und Sonne 150 000 000 km. Wie lange braucht das Licht, um von der Sonne zur Erde zu kommen?

3.15 Der Zusammenhang zwischen Impuls, Masse und Geschwindigkeit

Wir wissen: Der Impuls eines Gegenstandes ist umso größer, je schwerer und je schneller der Gegenstand ist. Dieser Satz macht eine Aussage über den Zusammenhang zwischen drei physikalischen Größen: dem Impuls p, der Masse m und der Geschwindigkeit v. Wir wollen jetzt untersuchen, wie dieser Zusammenhang genau aussieht: Wir suchen eine quantitative Beziehung.

Wir fragen nach der Abhängigkeit des Impulses von zwei anderen Größen. Die Lösung unseres Problems wird leichter, wenn wir es in zwei Teile zerlegen: Wir untersuchen als Erstes, wie der Impuls mit der Masse des betrachteten Gegenstandes zusammenhängt, und danach, wie er von der Geschwindigkeit abhängt.

Um den Einfluss der Masse auf den Impuls zu erhalten, betrachten wir mehrere Körper verschiedener Masse, die sich alle mit derselben Geschwindigkeit bewegen. Sehr übersichtlich wird unser Problem, wenn wir die Körper so wählen, wie es Abb. 3.62 zeigt. Körper A ist ein Gleiter auf der Luftkissenbahn, Körper B besteht aus zwei aneinander gekoppelten Gleitern, von denen jeder genauso schwer ist wie Körper A. Die Masse von B ist also doppelt so groß wie die von A: $m_B = 2 \cdot m_A$

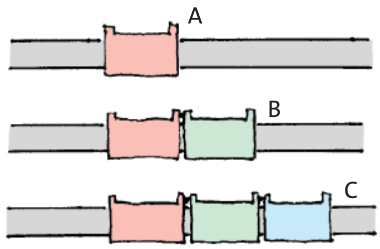


Abb. 3.62 Körper B hat die doppelte, Körper C die dreifache Masse von Körper A. Außerdem hat Körper B den doppelten und Körper C den dreifachen Impuls von Körper A.

Körper C besteht aus drei solchen Gleitern, er hat also dreimal die Masse von A: $m_C = 3\,m_A$

Wir können uns weitere Körper mit der vierfachen, fünffachen … Masse hinzudenken. Alle Körper A, B, C etc. sollen sich mit derselben Geschwindigkeit bewegen. Wie verhalten sich dann ihre Impulse zueinander? Körper B ist nichts anderes als zwei aneinander gehängte Exemplare von A. Wenn A den Impuls p_A hat, so muss B zweimal den Impuls p_A haben: $p_B = 2\,p_A$.

Da C aus drei Exemplaren des Körpers A besteht, und sich jedes von ihnen genauso schnell bewegt wie Körper A, muss C dreimal den Impuls von A haben: $p_C = 3\,p_A$

Wir sehen also, wie der Zusammenhang zwischen Impuls und Masse ist: Die Impulse von zwei Körpern unterscheiden sich um denselben Faktor wie ihre Massen, vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeiten gleich sind; in anderen Worten: Impuls und Masse sind proportional zueinander:

$$p \sim m \qquad \text{für } v = \text{const}$$

Dies ist der erste der gesuchten Zusammenhänge. Für den zweiten, nämlich den zwischen Impuls und Geschwindigkeit, müssen wir etwas mehr Aufwand treiben.

Die Idee ist: Wir vermindern den Impuls eines Körpers auf die Hälfte und messen, wie sich dabei die Geschwindigkeit ändert. Dann vermindern wir den Impuls auf ein Drittel und sehen wieder nach, wie sich v ändert, und so weiter. Im Einzelnen sieht das Experiment aus, wie es Abb. 3.63 zeigt.

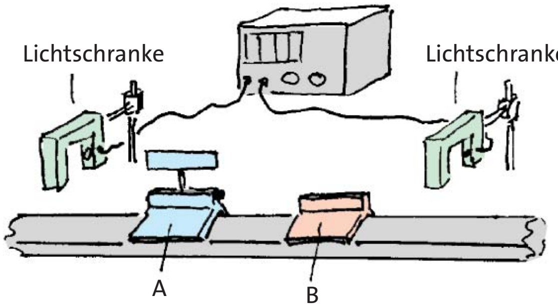


Abb. 3.63 Beim Zusammenstoß nimmt der Impuls von A auf die Hälfte ab. Die Messung ergibt, dass sich auch die Geschwindigkeit auf die Hälfte vermindert.

Körper A bewegt sich nach rechts, auf den ruhenden Körper B zu. A stößt mit B zusammen und bleibt an B hängen, sodass sich A und B gemeinsam weiter nach rechts bewegen. Wir messen die Geschwindigkeit von A vor und nach dem Zusammenstoß. (Nach dem Zusammenstoß ist sie genauso groß wie die von B.) Wir fragen nun nach den Werten von Impuls und Geschwindigkeit von Körper A, und zwar vor und nach dem Stoß.

Wir nennen den Impuls, den er vor dem Stoß hat, p_v, und den Impuls, den er danach hat, p_n. Da sich p_v beim Zusammenstoß gleichmäßig auf die beiden Körper A und B verteilt, hat A nach dem Stoß gerade noch halb so viel Impuls wie vorher. Es ist also:

$$p_n = (1/2) \cdot p_v$$

Die Geschwindigkeiten vor- und nachher liefert die Messung. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeit v_n nach dem Stoß gerade halb so groß ist wie die Geschwindigkeit v_v vor dem Stoß:

$$v_n = (1/2) \cdot v_v$$

Lässt man A gegen zwei ruhende Körper B und C stoßen, Abb. 3.64, so verteilt sich der Impuls auf drei Körper, und es ist

$$p_n = (1/3) \cdot p_v$$

Die Geschwindigkeitsmessung liefert in diesem Fall

$$v_n = (1/3) \cdot v_v$$

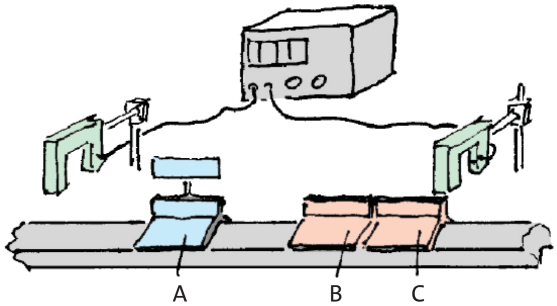


Abb. 3.64 Beim Stoß vermindern sich sowohl Impuls als auch Geschwindigkeit von Körper A auf ein Drittel des Anfangswertes.

Wir schließen daraus, dass für einen bestimmten Körper (d. h. für konstant gehaltene Masse) Impuls und Geschwindigkeit proportional zueinander sind:

$$p \sim v \qquad \text{für } m = \text{const}$$

Wir haben damit die beiden gesuchten Beziehungen einzeln: die zwischen p und m, und die zwischen p und v. Wir schreiben sie untereinander:

$$p \sim m \qquad \text{für } v = \text{const} \tag{3.1}$$

$$p \sim v \qquad \text{für } m = \text{const} \tag{3.2}$$

Die Mathematik sagt uns nun, dass man diese beiden Beziehungen zu einer einzigen zusammenfassen kann:

$$p \sim m \cdot v \tag{3.3}$$

Dass diese Proportionalität richtig ist, sieht man daran, dass aus ihr die beiden Beziehungen (3.1) und (3.2) folgen. Lässt man nämlich v konstant und verändert nur m, so wird aus (3.3) die Beziehung (3.1). Lässt man in (3.3) dagegen m konstant und verändert v, so entsteht (3.2).

Nun können wir mit (3.3) aber noch nicht den Impuls eines Körpers aus seiner Masse und seiner Geschwindigkeit berechnen. Hierzu müsste in (3.3) ein Proportionalitätsfaktor eingeführt werden. Wir haben aber Glück: Wir brauchen einen solchen Faktor gar nicht, denn die Maßeinheit des Impulses (Huygens) ist gerade so definiert, dass dieser Faktor gleich eins ist, falls wir die Masse in kg einsetzen und die Geschwindigkeit in m/s. Es ist also:

$$p = m \cdot v.$$

Dies ist das gesuchte Ergebnis. Wir haben damit eine sehr nützliche Formel. Wir können mit ihr den Impuls eines Körpers berechnen, wenn uns seine Masse und seine Geschwindigkeit bekannt sind. Masse und Geschwindigkeit sind zwei leicht messbare Größen. Wir haben damit eine einfache Methode zur Bestimmung von Impulswerten. Beachte, dass man mit dieser Formel den Impuls nur dann in der Maßeinheit Hy erhält, wenn man die Masse in kg und die Geschwindigkeit in m/s einsetzt.

Der Impuls eines Körpers ist proportional zur Masse und zur Geschwindigkeit des Körpers.

Wir betrachten die Gleichung $p = m \cdot v$ unter einem anderen Gesichtspunkt. Zwei Körper A und B haben die Massen $m_A = 1$ kg und $m_B = 1000$ kg. Jedem wird ein Impuls von 1 Hy zugeführt. Wie reagieren die Körper? Beide setzen sich in Bewegung — allerdings auf sehr verschiedene Weise. Aus $p = m \cdot v$ folgt

$$v = \frac{p}{m}$$

Für Körper A ergibt sich damit die Geschwindigkeit

$$v_A = \frac{p}{m_A} = \frac{1\ \text{Hy}}{1\ \text{kg}} = 1\ \text{m/s}$$

und für Körper B

$$v_B = \frac{p}{m_B} = \frac{1\ \text{Hy}}{1000\ \text{kg}} = 0{,}001\ \text{m/s}.$$

A wird also 1000-mal schneller als B. Es ist leichter, einen Körper kleiner Masse in Bewegung zu setzen als einen Körper großer Masse. Das lässt sich noch allgemeiner ausdrücken:

Es ist leichter, die Geschwindigkeit eines Körpers mit kleiner Masse zu ändern, als die eines Körpers mit großer Masse.

Man sagt auch, der schwere Körper habe eine größere Trägheit als der leichte.

Die Masse eines Körpers ist für seine Trägheit verantwortlich.

Aufgaben

1. Ein Lastwagen von 12 t (= 12 000 kg) fährt mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h. Welchen Impuls hat er?
2. Der Tormann stoppt einen Fußball, der mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s ankommt. Welcher Impuls fließt über den Tormann in die Erde? (Der Fußball wiegt 420 g.)
3. Ein Tennisball wird mit einer Geschwindigkeit von 30 m/s im rechten Winkel gegen eine Wand geschossen. Welcher Impuls fließt in die Wand? ($m = 50$ g.)
4. Willy beschleunigt einen gut gelagerten Wagen. Ein Kraftmesser zeigt den Impulsstrom an, der dabei in den Wagen fließt. Willy zieht 5 Sekunden lang. Wie groß ist die (Der Wagen wiegt 150 kg, der Kraftmesser zeigt 15 N an.)
5. Eine Lokomotive beschleunigt einen Zug. Durch die Kupplung zwischen Lokomotive und Wagen fließt dabei ein Impulsstrom von 200 kN. Wie groß ist der Impuls des Zuges (ohne Lokomotive) nach 30 Sekunden? Der Zug hat jetzt eine Geschwindigkeit von 54 km/h. Wie viel wiegt der Zug?
6. Ein 42 kg schwerer Wagen, der zunächst steht, wird beschleunigt, wobei ein Impulsstrom von 20 N durch die Zugstange fließt. Wie viel Impuls ist in 3 Sekunden in den Wagen geflossen? Seine Geschwindigkeit beträgt zu diesem Zeitpunkt 1,2 m/s. Wie groß ist sein Impuls? Wo ist der fehlende Impuls geblieben?
7. In einem 2 km langen, geraden Rohr von 10 cm Durchmesser fließt Wasser mit einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s. Mit einem Ventil, das sich am Ende des Rohrs befindet, wird das Wasser abgesperrt. Berechne den Impuls, den das Wasser dabei abgibt. Wo bleibt dieser Impuls? Das Absperren dauert 2 s. Wie groß ist die Kraft des Wassers auf das Absperrventil (die Impulsstromstärke)? Hinweis: Berechne zuerst das Wasservolumen in Litern. 1 l Wasser hat eine Masse von 1 kg.

3.16 SI-Einheiten

In dem Teil der Physik, den du bisher kennen gelernt hast, hat sich bewahrheitet, was wir ganz am Anfang der Mechanik behauptet hatten: Um die Welt physikalisch zu beschreiben, braucht man physikalische Größen. Ein wichtiges Ziel der Physik, wenn nicht sogar das wichtigste, ist es, Zusammenhänge zwischen diesen Größen zu finden.

Wir wollen einige der Größen zusammenstellen, die uns bisher begegnet sind, Tab. 3.6.

Name der Größe (Symbol)	SI-Einheit (Symbol)
Druck (p)	Pascal (Pa)
Energie (E)	Joule (J)
Energiestromstärke (P)	Watt (W)
Zeit (t)	Sekunde (s)
Impuls (p)	Huygens (Hy)
Impulsstromstärke (F)	Newton (N)
Geschwindigkeit (v)	Meter/Sekunde (m/s)
Weg (s)	Meter (m)
Masse (m)	Kilogramm (kg)

Tab. 3.6 Namen und SI-Einheiten physikalischer Größen

Du weißt, dass es für jede Größe eine Maßeinheit gibt. Für die meisten gibt es allerdings mehr als nur eine, Tab. 3.7. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Oft wurden in verschiedenen Bereichen von Naturwissenschaft, Technik oder Handwerk unterschiedliche Maßeinheiten definiert: Die Schneider benutzten die Elle, die Klempner das Zoll und die Physiker das Meter. Man einigte sich vielleicht auf eine einzige Einheit, aber unglücklicherweise in verschiedenen Ländern auf verschiedene. So wurde in den meisten europäischen Ländern die Masse in Kilogramm gemessen, in den USA aber in Pfund. Schließlich hat man sich zusammengefunden und ein international verbindliches Maßeinheitensystem festgelegt, das Système International. Danach hat jede Größe nur noch eine einzige Maßeinheit (mit wenigen Ausnahmen). Wir nennen diese Einheiten SI-Einheiten.

Die Einheiten, die in Tab. 3.6 hinter den Namen der Größen stehen, sind solche SI-Einheiten. Die Benutzung von SI-Einheiten hat nicht nur den Vorteil, dass man sich international leichter

Name der Größe	Einheiten
Druck	Pascal, Bar, Atmosphäre
Energie	Joule, Kalorie
Energiestromstärke	Watt, Pferdestärke (PS)
Zeit	Sekunde, Minute, ... Jahr
Impulsstromstärke, Kraft	Newton, Dyn
Geschwindigkeit	Meter/Sekunde, km/h, Knoten
Weg	Meter, Zoll, Lichtjahr
Masse	Kilogramm, Pfund

Tab. 3.7 SI-Einheiten und veraltete Einheiten

verständigen kann. Das Einheitensystem ist nämlich so eingerichtet, dass die physikalischen Formeln möglichst einfach werden. Wenn man in den Formeln, die du kennen gelernt hast, die Werte der Größen auf der rechten Seite in SI-Einheiten einsetzt, so kommt das Ergebnis, d. h. der Wert der Größe auf der linken Seite, in der SI-Einheit heraus. Würde man dagegen die Werte der rechten Seite in anderen Einheiten einsetzen, so könnte das Ergebnis in einer völlig ungebräuchlichen Einheit herauskommen. Wir wollen zwei Beispiele betrachten.

Nach der Gleichung

$$P = E/t$$

kann die Energiestromstärke aus Energie und Zeit berechnet werden. Setzt man die Energie in Joule ein und die Zeit in Sekunden, so kommt die Energiestromstärke in Joule pro Sekunde heraus. Nun ist aber 1 J/s gerade gleich 1 Watt. Wir erhalten also das Ergebnis in der SI-Einheit Watt. Hätten wir dagegen die Energie in Kalorien und die Zeit in Minuten eingesetzt, so hätten wir das Ergebnis in Kalorien pro Minute erhalten, also in einer Einheit, die ganz ungebräuchlich ist.

Wir wollen aus diesen Betrachtungen die folgende Lehre ziehen:

> Wenn du eine Aufgabe lösen willst und die Ausgangswerte nicht in SI-Einheiten vorliegen, rechne sie als Erstes in SI-Einheiten um.

4 DAS SCHWEREFELD

4.1 Senkrechte Bewegungen

Wir beschäftigen uns in den folgenden Abschnitten mit den Begriffen Erdanziehung und Schwerkraft und mit Gegenständen, die zur Erde fallen. Während wir bisher nur Bewegungen in der Waagrechten betrachtet haben, geht es hier um Bewegungen in der senkrechten Richtung. Wir können jedoch alles, was wir über waagrechte Bewegungen gelernt haben, für die Beschreibung senkrechter Bewegungen übernehmen. Wir müssen nur unsere x-Achse um 90° drehen, sodass sie senkrecht steht. Wir wollen die x-Achse so drehen, dass ihre positive Seite nach unten weist. Das bedeutet:

> Der Impuls eines Körpers ist positiv, wenn sich der Körper nach unten bewegt und negativ, wenn sich der Körper nach oben bewegt.

Wir hatten in Abschnitt 3.8 die folgende Regel gefunden:
- Impulsstrom nach rechts: Druckspannung
- Impulsstrom nach links: Zugspannung

Da das, was früher rechts war, jetzt unten, und was links war, oben ist, lautet die neue Regel:

> Impulsstrom nach unten: Druckspannung
> Impulsstrom nach oben: Zugspannung

Als Beispiel betrachten wir den geschlossenen Impulsstromkreis von Abb. 4.1.

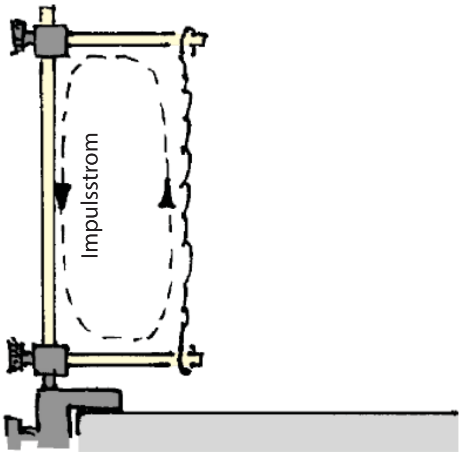


Abb. 4.1 Geschlossener Impulsstromkreis, bei dem die x-Achse senkrecht steht.

4.2 Die Erdanziehung — das Schwerefeld

Alle Gegenstände werden von der Erde angezogen. Das merkt man an zweierlei Erscheinungen:
- Man nimmt einen Gegenstand in die Hand und lässt ihn los. Er fällt nach unten.
- Jeder Gegenstand hat Gewicht.

Beide Erscheinungen zeigen, dass der Gegenstand Impuls von der Erde bekommt. Ein fallender Körper wird beim Fallen schneller: Sein Impuls nimmt zu.

Dass auch der nichtfallende Körper Impuls bekommt, sieht man zum Beispiel, wenn man ihn an einen Kraftmesser hängt, Abb. 4.2. Der Kraftmesser zeigt an, dass ein Impulsstrom vom Körper weg über die Aufhängung in die Erde fließt. Dieser Impuls muss nachgeliefert werden. Es fließt also ständig Impuls in den Körper, allerdings über eine Verbindung zwischen Körper und Erde, von der absolut nichts zu sehen ist.
Wir hatten früher schon eine impulsleitende Verbindung kennen gelernt, die man nicht sehen kann: das Magnetfeld. In dem Fall, der uns gerade interessiert, kann es sich allerdings nicht um ein Magnetfeld handeln, denn dann dürften von der Erde nur Magneten oder eiserne Körper angezogen werden. Die Verbindung besteht also aus einem Gebilde, das zwar kein Magnetfeld ist, das aber mit ihm verwandt ist. Man nennt es das Schwerefeld. Genauso, wie ein Magnetpol von einem Magnetfeld umgeben ist, so ist jedes Gebilde, das eine Masse hat, also jeder Körper, von einem Schwerefeld umgeben. Je größer die Masse des Körpers ist, desto dichter ist dieses Feld.

Jeder Körper ist von einem Schwerefeld umgeben. Je größer die Masse des Körpers, desto dichter ist das Feld. Durch das Schwerefeld fließt Impuls von einem Körper zum anderen. Die Erdanziehung kommt durch einen Impulsstrom von der Erde zu dem betreffenden Körper zustande.

4.3 Wovon die Erdanziehung abhängt

Wir probieren es aus. Wir hängen zuerst ein Stück Eisen mit einer Masse von 1 kg an einen Kraftmesser und dann ein Stück Holz von 1 kg. Der Kraftmesser zeigt beide Male dasselbe an. Ist das eine Überraschung? Natürlich nicht. Wie stellt man denn überhaupt fest, ob ein Stück Eisen oder ein Stück Holz eine Masse von 1 kg hat? Indem

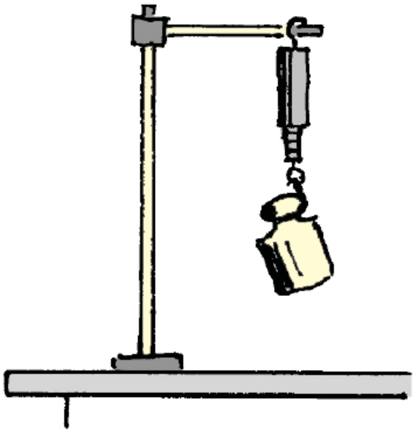


Abb. 4.2 Der Impuls, der ständig über den Kraftmesser und die Aufhängung in die Erde abfließt, gelangt über eine unsichtbare Verbindung in den Körper.

man es auf eine Waage legt. Die meisten Waagen funktionieren aber genauso wie unser Federkraftmesser. Wir definieren also über die Waage oder über den Kraftmesser, was wir unter zwei gleichen Massen verstehen: Wenn zwei Körper an einem Kraftmesser denselben Ausschlag verursachen, haben sie dieselbe Masse.

Wir können das auch anders ausdrücken: Wenn in zwei Körper von der Erde aus gleich starke Impulsströme fließen, haben sie dieselbe Masse.

Wir betrachten nun zwei Körper mit je einer Masse von 1 kg. Beide zusammen können wir auffassen als einen einzigen Körper mit einer Masse von 2 kg. In beide zusammen fließt ein Impulsstrom, der doppelt so stark ist wie der, der in einen einzigen Körper fließt. Das erscheint dir vielleicht selbstverständlich. Man könnte sich aber durchaus vorstellen, dass das Hinzunehmen eines zweiten Körpers den Impulsstrom, der in den ersten fließt, beeinflusst.

Wie stark ist nun der Impulsstrom, der in den Körper mit der Masse 1 kg fließt? Wir lesen am Kraftmesser ab, dass er eine Stärke von ungefähr 10 N hat. Eine genauere Messung ergibt einen Wert von 9,81 N. In einen Körper mit einer Masse von 2 kg fließen entsprechend $2 \cdot 9{,}81\ \mathrm{N} = 19{,}62\ \mathrm{N}$ und in einen 10-kg-Körper 98,1 N. Wir haben es also wieder mit einer Proportionalität zu tun: Die Stärke des Impulsstroms, der von der Erde in einen Körper fließt, ist proportional zur Masse des Körpers:

$$F \sim m$$

Der Proportionalitätsfaktor hat den Wert 9,81 N/kg:

$$F = m \cdot 9{,}81 \text{ N/kg}$$

Unsere Überlegung ist noch nicht vollständig. Ein Kilogramm Eisen wiegt zwar genauso viel wie ein Kilogramm Holz, aber ein Kilogramm Eisen wiegt auf dem Mond nicht so viel wie auf der Erde. Wir machen daher — in Gedanken — das folgende Experiment. Wir nehmen einen Gegenstand mit einer Masse von 1 kg und wägen ihn an verschiedenen Orten: hier bei uns zu Hause, dann am Nordpol, am Äquator, auf dem Mond, auf dem Mars, auf der Sonnenoberfläche, auf einem Neutronenstern. Die Ergebnisse der Wägungen sind in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Ort	*g* in N/kg
Mitteleuropa	9,81
Nord- und Südpol	9,83
Äquator	9,78
Mondoberfläche	1,62
Marsoberfläche	3,8
Sonnenoberfläche	274
Oberfläche eines Neutronensterns	1 000 000 000 000

Tab. 4.1 Werte des Ortsfaktors an verschiedenen Orten

An jedem der Orte gilt die Proportionalität

$$F \sim m.$$

Der Proportionalitätsfaktor hat aber je nach Ort einen anderen Wert. An den verschiedenen Stellen der Erdoberfläche unterscheiden sich die Werte zwar nur wenig, aber auf anderen Himmelskörpern weichen sie von dem Wert auf der Erde sehr stark ab. Wir schreiben den Zusammenhang zwischen F und m daher in der allgemeinen Form

$$F = m \cdot g.$$

Da der Proportionalitätsfaktor g von dem Ort abhängig ist, an dem sich der Körper der Masse m befindet, nennt man ihn den Ortsfaktor.

Die Stärke des Impulsstroms von der Erde in einen Körper ist gleich dem Produkt aus Masse des Körpers und Ortsfaktor. Der Ortsfaktor hat an der Erdoberfläche den Wert 9,81 N/kg ≈ 10 N/kg.

Hier noch die Beschreibung der Erdanziehung im Kraftmodell: Die Größe F nennt man die Schwerkraft oder die Gewichtskraft, und man sagt, auf einen Körper wirke die Schwerkraft.

Was meint man, wenn man von einem Gegenstand sagt, er sei sehr schwer? Man meint wohl, dass es schwer ist, ihn vom Boden aufzuheben. Meint man also, er habe eine große Masse? Wahrscheinlich nicht. Auf dem Mond wäre es schließlich gar nicht schwer, diesen „schweren" Gegenstand vom (Mond-)Boden aufzuheben. Mit „schwer" meint man also eher, dass ein starker Impulsstrom in den Körper fließt, oder in anderen Worten, dass die Gewichtskraft, die auf ihn wirkt, groß ist. Ein und derselbe Gegenstand kann also schwer oder leicht sein, je nachdem, wo er sich befindet.

Aufgaben

1. Welcher Impulsstrom fließt aus der Erde in deinen eigenen Körper? (Welche Gewichtskraft wirkt auf deinen Körper?) Wie stark wäre dieser Impulsstrom auf dem Mond, wie stark wäre er auf einem Neutronenstern?
2. Astronauten bestimmen bei einer Mondexpedition die Gewichtskraft auf einen Körper mit einem Kraftmesser. Sie finden $F = 300$ N. Welche Masse hat der Körper?

4.4 Der freie Fall

Wir nehmen einen Gegenstand in die Hand und lassen ihn los. Er fällt zum Boden. Wir können diese Erscheinung jetzt erklären: In den Gegenstand fließt ein Impulsstrom der Stärke $m \cdot g$ hinein, also nimmt sein Impuls ständig zu. Er fällt immer schneller, je länger er fällt.

Etwas ist dabei allerdings merkwürdig. Lässt man zwei Gegenstände, einen schweren und einen leichten, gleichzeitig aus derselben Höhe los, so stellt man fest, dass sie gleichzeitig auf dem Erdboden auftreffen. Sollte nicht eigentlich der schwere schneller ankommen? Er bekommt doch mehr Impuls von der Erde.

Wir wollen berechnen, nach welchem Gesetz der Impuls der beiden Körper zunimmt. Wir nehmen an, die Masse des schweren Körpers beträgt 4 kg, die des leichten 1 kg. Wir setzen

$$F = m \cdot g$$

ein in

$$p = F \cdot t$$

und erhalten

$$p = m \cdot g \cdot t. \qquad (4.1)$$

Hier setzen wir die Masse und den Ortsfaktor ein und erhalten für den schweren Körper

$$p = 4\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} \cdot t = 40\ \text{N} \cdot t$$

und für den leichten

$$p = 1\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} \cdot t = 10\ \text{N} \cdot t.$$

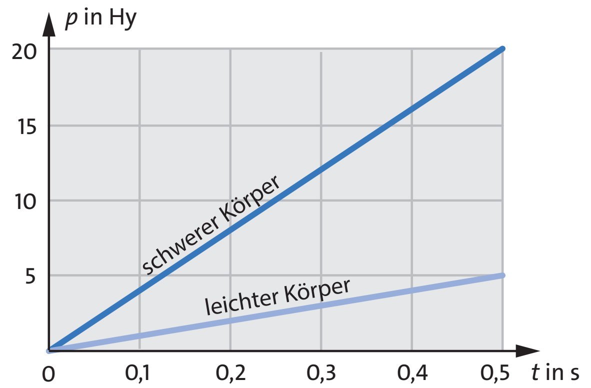


Abb. 4.3 Impuls als Funktion der Zeit für zwei fallende, verschieden schwere Körper

Diese beiden p-t-Zusammenhänge sind in Abb. 4.3 dargestellt. Die Abbildung bringt zum Ausdruck, dass der Impuls jedes der beiden Gegenstände gleichmäßig zunimmt. Der Impuls des schweren Körpers wächst aber schneller als der des leichten. Der schwere hat in jedem Augenblick viermal so viel Impuls wie der leichte.

Warum fallen dann aber beide Körper gleich schnell? Um die Antwort auf diese Frage zu finden, brauchen wir die Gleichung

$$p = m \cdot v. \qquad (4.2)$$

Aus ihr folgt nämlich: Um den schweren Körper auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu bringen, braucht man viermal so viel Impuls wie man braucht, um den leichten auf dieselbe Geschwindigkeit zu bringen. Der Körper mit der größeren Masse hat eine größere Trägheit als der mit der kleinen Masse.

Wir erhalten dieses Ergebnis ebenfalls durch eine einfache Rechnung. Wir setzen die rechten Seiten von (4.1) und (4.2) gleich und erhalten

$$m \cdot g \cdot t = m \cdot v$$

Division beider Seiten durch m ergibt

$$v = g \cdot t \qquad (4.3)$$

Diese Gleichung sagt uns, dass die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers gleichmäßig zunimmt. Da in ihr die Masse nicht mehr auftritt, sagt sie uns auch, dass die Geschwindigkeit, mit der ein Körper fällt, nicht von der Masse des Körpers abhängt. In Abb. 4.4 ist die Geschwindigkeit eines beliebigen frei fallenden Körpers über der Zeit aufgetragen.

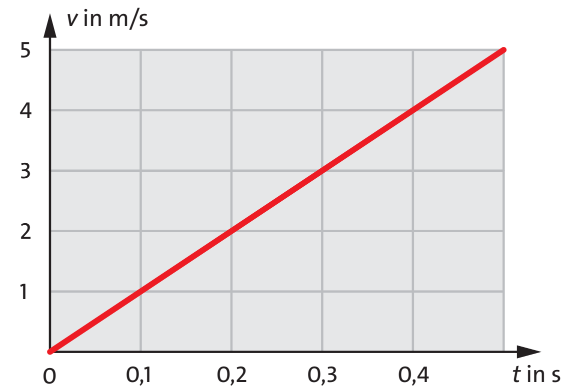


Abb. 4.4 Die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers nimmt linear mit der Zeit zu.

Dass in Gleichung (4.3) der Ortsfaktor auftritt, bedeutet, dass die Fallgeschwindigkeit vom Ort abhängt, an dem sich der fallende Körper befindet. Auf dem Mond zum Beispiel fallen alle Körper etwa sechsmal so langsam wie auf der Erde.

Für frei fallende Körper gilt:
- Wenn ein Körper A eine doppelt so große Masse hat wie Körper B, so bekommt er von der Erde doppelt so viel Impuls pro Sekunde. Er braucht aber auch doppelt so viel Impuls, um auf dieselbe Geschwindigkeit zu kommen wie B.
- Die Geschwindigkeit fallender Körper nimmt gleichmäßig zu.
- Alle Körper fallen gleich schnell.

Wir waren bei unseren Überlegungen davon ausgegangen, dass der fallende Körper Impuls nur von der Erde bekommt, und dass er beim Fallen keinen Impuls verliert. Damit haben wir die tatsächliche Situation vereinfacht: Durch die Reibung mit der Luft verliert der fallende Körper in Wirklichkeit Impuls. Ist ein Körper nicht zu leicht, und fällt er nur über eine kurze Strecke, so ist unsere Vereinfachung gerechtfertigt. Man nennt einen solchen Bewegungsvorgang einen freien Fall. Wenn der Körper aber sehr leicht ist und außerdem noch eine große Oberfläche hat, so stimmen unsere Überlegungen nicht mehr.

Wir betrachten eine weitere Variante des freien Falls: Wir lassen den Gegenstand nicht einfach aus dem Ruhezustand fallen, sondern werfen ihn senkrecht nach oben. Er hat dann beim Start negativen Impuls. Er bekommt nach wie vor von der Erde ständig neuen positiven Impuls, was zur Folge hat, dass sein negativer Impuls weniger und weniger wird: Der Gegenstand fliegt immer langsamer, kommt zum Stillstand und beginnt schließlich, sich in die positive Richtung (nach unten) zu bewegen.

Die Aufwärtsbewegung ist hierbei das Spiegelbild der Abwärtsbewegung. Beim Herunterfallen nimmt der Impuls des Körpers gleichmäßig zu, beim Hinauffliegen nimmt sein negativer Impuls gleichmäßig ab. Das Entsprechende gilt für die Geschwindigkeit: Beim Hinauffliegen nimmt die negative Geschwindigkeit linear mit der Zeit ab, beim Herunterfallen nimmt die (positive) Geschwindigkeit linear mit der Zeit zu.

Abb. 4.5 zeigt die Geschwindigkeit als Funktion der Zeit. Als Nullpunkt der Zeitachse haben wir hier den Zeitpunkt der Umkehr gewählt. Der Wurf findet bei dieser Zählung im Zeitpunkt „minus 0,4 Sekunden“ statt. Man sieht an dem Schaubild, dass der Gegenstand zum Hinauffliegen dieselbe Zeit braucht wie zum Herunterfallen.

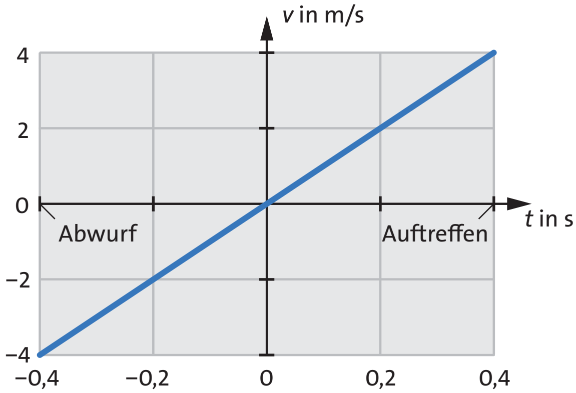


Abb. 4.5 Die Geschwindigkeit eines Körpers, der nach oben geworfen wurde. Beim Hinauffliegen ist die Geschwindigkeit negativ, beim Herunterfallen positiv.

Aufgaben

1. Du springst vom 3-m-Brett ins Wasser. Der freie Fall beim Sprung dauert 0,77 s. Wie groß ist dein Impuls beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche? Wie groß ist deine Geschwindigkeit?
2. Wie groß ist die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers nach einer Fallzeit von 1/2 Sekunde auf der Erde, auf dem Mond und auf der Sonne?
3. Ein Stein wird nach oben geworfen. Seine Anfangsgeschwindigkeit ist 15 m/s. Nach welcher Zeit trifft er wieder auf die Erde auf?
4. Ein Stein wird mit einer Steinschleuder nach oben geschleudert. Nach 5 Sekunden schlägt er auf die Erde auf. Wie groß war seine Anfangsgeschwindigkeit?

4.5 Fallen mit Reibung

Häufig ist die Luftreibung nicht vernachlässigbar. Wie groß sie ist, hängt ab
- von der Form des Körpers,
- von seiner Geschwindigkeit.

Sicher ist dir das vom Auto her bekannt:
- Man versucht, die Form der Autokarosserie so zu gestalten, dass die Luftreibung möglichst klein ist.
- Fährt man schnell, so ist die Reibung, und damit der Benzinverbrauch (pro Kilometer), viel größer als wenn man langsam fährt.

Dass die Reibung, d.h. die Stärke des Impulsstroms, der in die Luft abfließt, mit zunehmender Geschwindigkeit sehr stark wächst, zeigen Abb. 4.6 und Abb. 4.7. In beiden Bildern ist der Reibungsimpulsverlust über der Geschwindigkeit aufgetragen, in Abb. 4.6 für einen typischen Personenwagen und in Abb. 4.7 für einen viel kleineren Gegenstand: für einen Ball von 30 cm Durchmesser.

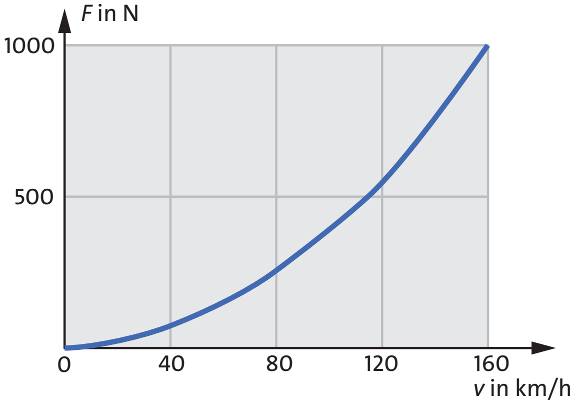


Abb. 4.6 Stärke des Impulsstroms, der in die Luft abfließt, als Funktion der Geschwindigkeit für einen typischen Personenwagen

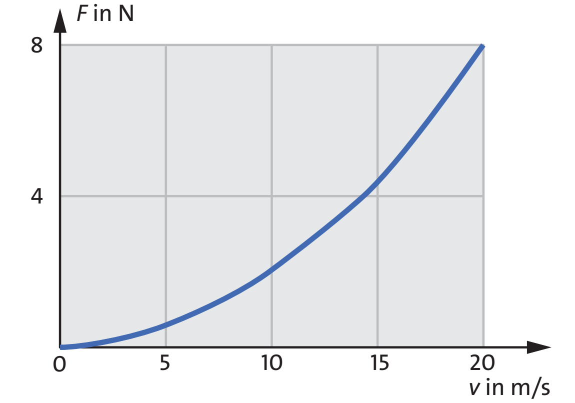


Abb. 4.7 Stärke des Impulsstroms, der in die Luft abfließt, als Funktion der Geschwindigkeit für eine Kugel von 30 cm Durchmesser

Wir hatten gesehen: Wenn diese Reibungsverluste nicht wären oder solange sie vernachlässigbar sind, fallen alle Körper gleich schnell. Wie verhält es sich aber mit der Fallgeschwindigkeit, wenn man die Reibung nicht mehr vernachlässigen kann?

Wir lassen einen großen, sehr leichten Ball fallen, Abb. 4.8, linke Seite. Seine Masse betrage m = 100 g = 0,1 kg, sein Durchmesser 30 cm = 0,3 m.

Von der Erde fließt in den Ball ständig ein Impulsstrom von

$$F = m \cdot g = 0{,}1\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} = 1\ \text{N}.$$

Beim Fallen ist seine Geschwindigkeit ganz am Anfang noch gering, und damit auch der Impulsverlust an die Luft. Bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s hat der Impulsstrom, der in die Luft fließt, immer noch eine Stärke von weniger als 0,1 N, siehe Abb. 4.7. Der Verlust ist also noch klein, verglichen mit dem Impulsstrom von 1 N, der aus der Erde kommt. Der Verlust wird aber schnell

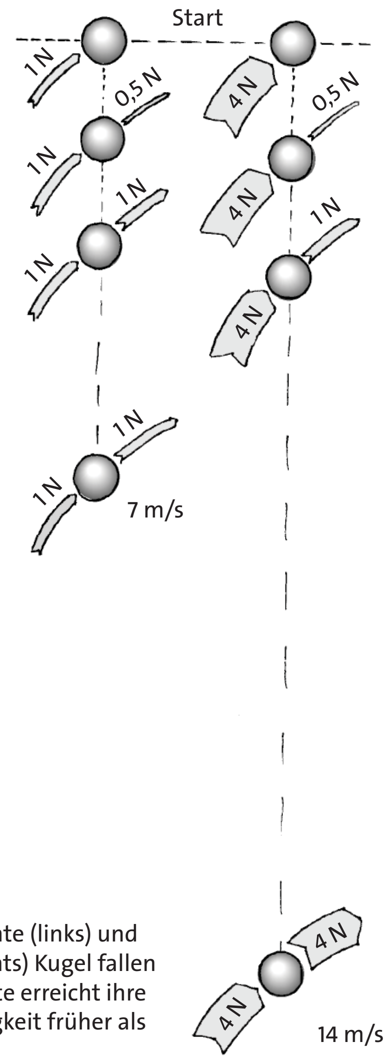


Abb. 4.8 Eine leichte (links) und eine schwere (rechts) Kugel fallen zur Erde. Die leichte erreicht ihre Grenzgeschwindigkeit früher als die schwere.

größer, und schließlich verliert der Ball pro Sekunde genauso viel Impuls an die Luft wie er von der Erde bekommt. Von jetzt an nimmt sein Impuls nicht mehr zu. Abb. 4.7 entnehmen wir, dass der Ball dann eine Geschwindigkeit von etwa 7 m/s hat.

Abb. 4.9 zeigt die Geschwindigkeit des Balls über der Zeit: Ganz am Anfang nimmt seine Geschwindigkeit fast linear mit der Zeit zu; er verhält sich wie ein frei fallender Ball. Nach und nach wird aber der Verlust größer. Schließlich, wenn die zu- und die wegströmenden Impulsmengen gleich sind, nimmt sein Impuls, und daher auch seine Geschwindigkeit, nicht mehr zu. Er hat seine Grenzgeschwindigkeit erreicht. Der Ball befindet sich jetzt im Zustand des Fließgleichgewichts.

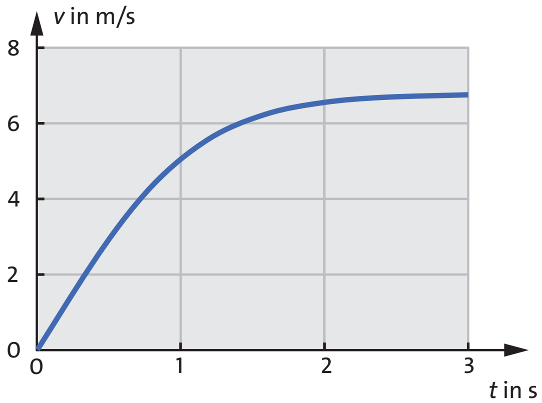


Abb. 4.9 Wenn Luftreibung vorhanden ist, wächst die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers bis zu einer Grenzgeschwindigkeit.

Wir lassen nun einen anderen Ball fallen. Er soll denselben Durchmesser (30 cm) haben, aber viermal so schwer sein wie der erste, Abb. 4.8, rechte Seite:

$$m = 0{,}4\ \text{kg}.$$

Von der Erde, über das Schwerefeld, fließt in den Ball ein Impulsstrom von

$$F = m \cdot g = 0{,}4\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} = 4\ \text{N}$$

Bei welcher Geschwindigkeit hört dieser Ball auf, schneller zu werden? Wieder befragen wir das Schaubild von Abb. 4.7. Der Verlustimpulsstrom ist gerade dann gleich dem von der Erde kommenden Impulsstrom, wenn die Geschwindigkeit 14 m/s beträgt. Der schwere Ball erreicht also das Fließgleichgewicht bei einer höheren Geschwindigkeit als der leichte.

> Bei hohen Geschwindigkeiten ist die Luftreibung nicht mehr vernachlässigbar.
>
> Die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers wächst nur bis zu einer Grenzgeschwindigkeit. Die Grenzgeschwindigkeit hängt von der Form des Körpers ab. Sie ist für schwere Körper größer als für leichte.

Eine interessante Anwendung unserer Überlegungen stellt das Fallschirmspringen dar. Die fallschirmspringende Person springt aus dem Flugzeug und erreicht innerhalb weniger Sekunden ihre Grenzgeschwindigkeit von etwa 50 m/s. Mit dieser Geschwindigkeit „fällt“ sie dann eine längere Zeit. Der Impulsstrom, der über das Schwerefeld in die Person fließt, hat dieselbe Stärke wie der, der aufgrund der Luftreibung abfließt.

Etwa 400 m über dem Erdboden wird der Fallschirm geöffnet. Das Öffnen des Fallschirms bedeutet, dass die Luftreibung plötzlich stark erhöht wird. Der abfließende Impulsstrom wird plötzlich viel größer als der zufließende. Dadurch nimmt der Impuls ab. Mit dem Impuls nimmt auch die Geschwindigkeit ab, und damit der Reibungsverlust. Schließlich erreicht der Reibungsimpulsstrom wieder denselben Wert wie der Schwereimpulsstrom, allerdings bei einer relativ niedrigen Geschwindigkeit: bei etwa 4 m/s. Der Fallschirm schwebt jetzt also mit der daran hängenden Person mit konstanter, niedriger Geschwindigkeit zur Erde. In Abb. 4.10 ist die Geschwindigkeit der Person über der Zeit aufgetragen.

Unsere Überlegungen zur Grenzgeschwindigkeit sind ungültig, wenn keine Luft oder kein anderes reibendes Medium vorhanden ist. Der Mond hat keine Atmosphäre. Daher fallen hier wirklich alle Körper gleich schnell: Ein Blatt Papier fällt genauso schnell zum Boden wie ein großer Stein. Man kann das aber auch auf der

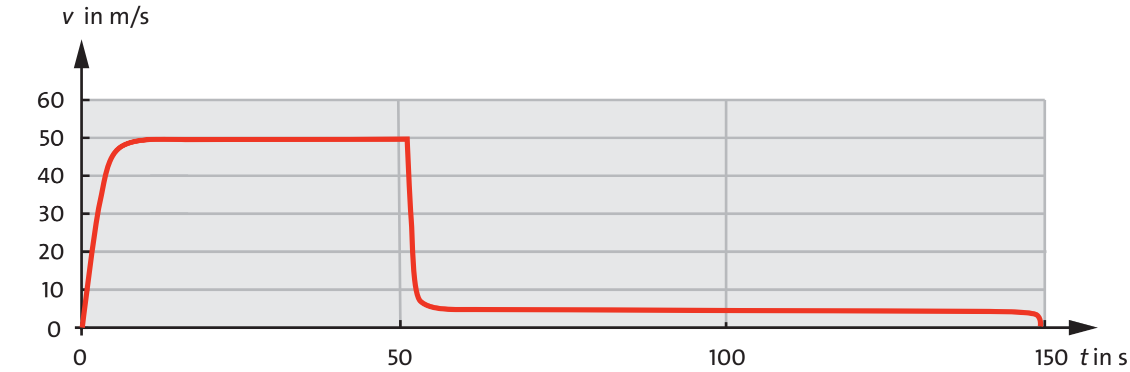


Abb. 4.10 Geschwindigkeit einer fallschirmspringenden Person als Funktion der Zeit

Erde beobachten. Man muss dazu die Fallversuche nur in einem Gefäß ausführen, aus dem die Luft herausgepumpt wurde. Wir lassen einige kleine Gegenstände sehr unterschiedlicher Masse in einem evakuierten Glasrohr fallen. Wie erwartet fallen sie alle gleich schnell.

Aufgabe

1. Welche Grenzgeschwindigkeit erreicht eine fallende Kugel mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Masse von 0,8 kg?

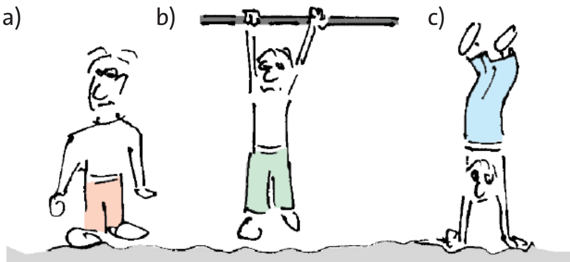


Abb. 4.11 Wie er's auch anstellt, der Mann wird sein Schweregefühl nicht los.

Abb. 4.12 Die Impulsströme, die über das Schwerefeld in die Person hineinfließen, müssen wieder abfließen.

4.6 Schwerelosigkeit

Der Mann in Abb. 4.11a fühlt sich schwer, sein Körper hat das Gewicht seines schweren Kopfes zu tragen, und seine Füße sind am schlechtesten dran: Sie müssen den ganzen Körper tragen. Der Mann hat eine Idee, siehe Abb. 4.11b. Die Beine sind entlastet. Dafür haben allerdings jetzt die Arme die ganze Last zu tragen. In Abb. 4.11c sieht man seinen dritten Versuch, sein Gewicht loszuwerden — aber wieder erfolglos.

Was den Mann in Abb. 4.11 stört, ist das „Schweregefühl". Wir wollen versuchen, dieses Gefühl physikalisch zu definieren. Was der Mann in jedem der drei Fälle spürt, sind Impulsströme, die in seinem Körper fließen. In jeden Teil seines Körpers fließt über das Schwerefeld Impuls hinein und muss abgeleitet werden; er muss in die Erde zurückfließen. In Abb. 4.12 sind diese Ströme für eine stehende Person skizziert: Es fließt Impuls in den Kopf, in die Arme, in den Oberkörper usw. All dieser Impuls muss nach unten durch die Beine und die Füße in die Erde abfließen. Der Impulsstrom ist also in den Füßen am stärksten.

Wir betrachten im Folgenden eine Art Modellperson: Sie besteht aus zwei aufeinander liegenden Klötzen (dem oberen Teil des Körpers und dem unteren Teil sozusagen), Abb. 4.13. Man sieht, dass der Impulsstrom an der Unterseite des unteren Klotzes doppelt so groß ist wie an der Unterseite des oberen. Wir möchten diese „Person" nun in den Zustand der Schwerelosigkeit versetzen: in einen Zustand, in dem keine Impulsströme durch sie hindurchfließen. Oder in

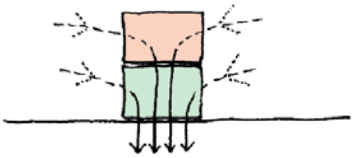


Abb. 4.13 Eine Modellperson. Sie besteht nur aus Ober- und Unterkörper.

anderen Worten: in einen Zustand, in dem keiner ihrer Teile unter Druck- oder unter Zugspannung steht.

Du wirst wahrscheinlich glauben, dass man die Person dazu sehr, sehr weit von der Erde wegbringen müsste, an eine Stelle, wo vom Schwerefeld der Erde nichts mehr zu spüren ist. Dort würde kein Impuls in unsere Person fließen. Also könnte auch kein Impuls durch sie hindurchfließen. Das wäre tatsächlich eine Möglichkeit. Es gibt aber eine andere, viel einfachere Methode: Wir lassen den Impuls zwar in die Person hinein- aber nicht wieder herausfließen. Auch dann fließt kein Impuls mehr durch sie hindurch, und sie fühlt sich schwerelos.

Wie kann man das anstellen? Ganz einfach: Damit der Impuls aus der Person nicht wieder herauskann, d. h., damit der Impuls nicht in die Erde abfließen kann, genügt es, die Verbindung zur Erde zu unterbrechen. Wir müssen also unsere Person einfach frei fallen lassen, Abb. 4.13. Jetzt fließt zwar aus dem Schwerefeld in jeden Klotz (in jeden Teil der Person) und an jede Stelle der Klötze Impuls hinein. Aber dieser fließt in den Klötzen nicht mehr umher. Und insbesondere fließt kein Impuls mehr vom einen Klotz in den anderen. Die Folge davon: Es herrschen keinerlei Druck- oder Zugspannungen mehr. Der untere Klotz spürt das Gewicht des darüber liegenden nicht mehr.

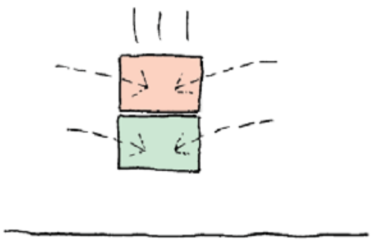


Abb. 4.14 Ein frei fallender Körper ist schwerelos. In ihm fließen keine Impulsströme.

Für dich selbst, d. h. eine richtige Person, gilt natürlich dieselbe Schlussfolgerung: Wenn du von irgendwo herunterspringst, bist du, solange du fällst, schwerelos. Ja sogar wenn du nach oben springst, bist du schwerelos, sobald du den Kontakt zur Erde verloren hast, und bleibst es, bis du wieder auf der Erde stehst.

Nun ist die Zeit, die man beim Fallen in der Luft zubringt, so kurz, dass man das Schwerelosigkeitsgefühl kaum richtig zur Kenntnis nehmen kann. Wir machen deshalb einen Versuch mit unserer Modellperson, Abb. 4.15. Die beiden Klötze stehen auf einer Platte, die mit Bindfäden aufgehängt ist, ähnlich wie eine Waagschale. Zwischen dem unteren und dem oberen Klotz befindet sich ein dünnes Brettchen, das über eine dünne, gespannte Gummischnur mit der Wand verbunden ist. Die Gummischnur würde das Brettchen herausziehen, wenn es nicht durch das Gewicht des oberen Klotzes eingeklemmt wäre.

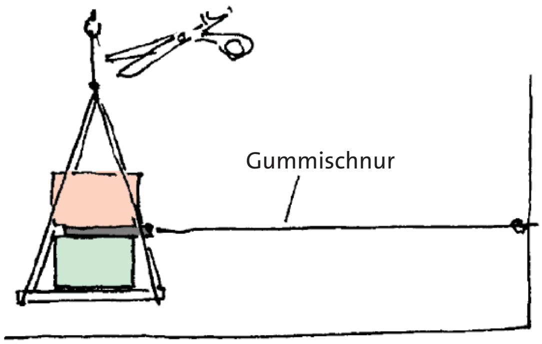


Abb. 4.15 Während des freien Fallens sind die Klötze schwerelos. Das eingeklemmte Brettchen wird losgelassen.

Nun das Experiment: Wir schneiden den Faden durch, an dem die ganze Anordnung hängt. Im selben Augenblick schießt das Brettchen, von dem Gummiseil gezogen, heraus. Warum? Der Klotzturm ist eine sehr kurze Zeit lang frei gefallen. Während dieser kurzen Zeit war er schwerelos. Der obere Klotz hat nicht mehr auf den unteren gedrückt, er hat das Brettchen losgelassen.

Du weißt, dass sich Astronauten in ihrem Raumfahrzeug schwerelos fühlen. Was ist die Erklärung hierfür? Dass sie so weit von der Erde weg sind? Keineswegs. Das Spaceshuttle fliegt in etwa 250 km Höhe. Das ist, verglichen mit dem Erdradius, sehr wenig. Es fliegt eigentlich ganz dicht über der Erdoberfläche, Abb. 4.16. Das Schwerefeld der Erde ist dort noch fast genauso dicht wie bei uns hier unten: Der Ortsfaktor in 250 km Höhe ist $g = 9{,}08$ N/kg, also kaum kleiner als an der Erdoberfläche.

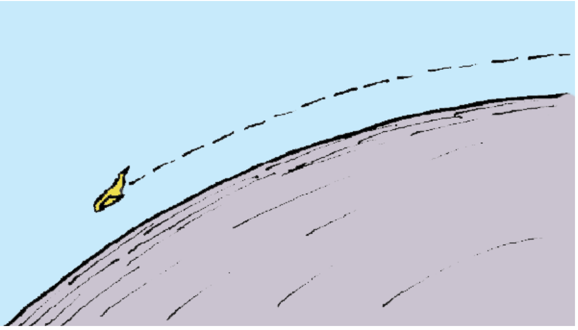


Abb. 4.16 Die Spaceshuttle fliegt in nur 250 km Höhe. Der Ortsfaktor ist hier kaum kleiner als an der Erdoberfläche.

Die Erklärung der Schwerelosigkeit muss also eine andere sein. Sie ist genau die, die wir für fallende Gegenstände gefunden hatten: Ein Raumschiff ist, sobald die Antriebsraketen abgebrannt sind, ein frei fallender Körper. Warum fällt dann aber das Raumschiff nicht auf die Erde herunter? Nun, genau das ist es, was es tut. Es hat allerdings immer einen sehr großen Impuls in waagrechter Richtung. Es fällt also wie ein waagrecht geworfener Stein; nur fällt es so weit weg, dass es immer „hinter der Erde herunterfällt". Es „fällt" also immer im Kreis herum und trifft nie auf die Erdoberfläche auf.

Frei fallende Körper sind schwerelos.

Aufgaben

1. Ein Astronaut hat in seinem Raumschiff zwei gleich aussehende Gegenstände verschiedener Masse vor sich. Kann er herausbekommen, welches der Körper mit der größeren Masse ist, und wenn ja, wie?
2. Ein Raumschiff befindet sich so weit von der Erde weg, dass praktisch kein Schwerefeld mehr vorhanden ist. Die Astronauten möchten nun gern wieder einmal ihre Schwere spüren. Was können sie tun, ohne zur Erde oder zu einem anderen Himmelskörper zu fliegen?

4.7 Die Dichte der Stoffe

„Was ist schwerer: 1 kg Eisen oder 1 kg Holz?" Jeder kennt diese Frage, die man stellt, um jemanden hineinzulegen. Die richtige Antwort soll natürlich lauten: „Beide sind gleich schwer." Wer aber nicht aufpasst und das „kg" überhört, sagt wahrscheinlich, das Eisen sei schwerer.

Man erkennt hieran, dass die Wörter „schwer" und „leicht" in zwei etwas verschiedenen Bedeutungen gebraucht werden:

- um ein Gewicht oder eine Masse zu bezeichnen: 1,5 kg Zucker ist schwerer als 0,8 kg Mehl;
- um eine Stoffeigenschaft zum Ausdruck zu bringen: Man sagt, Eisen sei schwerer als Holz, weil ein Stück Eisen eine größere Masse hat als ein Stück Holz desselben Volumens.

Diese zweite Bedeutung von „schwerer" und „leichter" wird quantitativ zum Ausdruck gebracht durch die Dichte des Stoffs. Unter der Dichte ρ eines Stoffs versteht man den Quotienten aus Masse m und Volumen V:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Als SI-Maßeinheit ergibt sich kg/m^3. In Tab. 4.2 sind die Dichten einiger Stoffe aufgeführt.

Stoff	ρ in kg/m^3
Buchenholz	600 – 900
Granit	2600
Aluminium	2700
Eisen	7800
Kupfer	8960
Gold	19300
Benzin	720
Ethanol (gewöhnlicher Alkohol)	790
Wasser	998
Trichlorethylen	1460
Quecksilber	13550
Wasserstoff	90
Stickstoff	1,25
Luft	1,29
Sauerstoff	1,43
Kohlenstoffdioxid	1,9

Tab. 4.2 Die Dichte einiger Stoffe bei $p = 1$ bar und $\rho =$ 20 °C

Hier ist ein Punkt zu beachten: Einige Stoffe, nämlich die gasförmigen, lassen sich leicht zusammendrücken. Daher kann man ihre Dichte sehr leicht verändern, indem man den Druck oder die Temperatur ändert. Gibt man eine Dichte an, so muss man also auch angeben, für welchen Druck und welche Temperatur sie gilt. Bei festen und flüssigen Stoffen ist dieser Effekt sehr klein. Die Werte der Tabelle beziehen sich auf p = 1 bar und ϑ = 20 °C.

Die Dichte von Gasen ist viel kleiner als die von Flüssigkeiten und Feststoffen. Wir wollen uns als Faustregel merken:

> Die Dichte von Flüssigkeiten und Feststoffen ist etwa 1000-mal so groß wie die von Gasen.

Um die Dichte eines Stoffs zu messen, nimmt man eine beliebige Menge des Stoffs, bestimmt seine Masse m und sein Volumen V und dividiert m durch V.

Manchmal sind die Messungen von m und V sehr einfach, manchmal aber nicht. Um zum Beispiel die Dichte von Benzin zu bestimmen, genügt es, 1 l = 0,001 m^3 abzufüllen und zu wägen. Man findet m = 0,72 kg. Daraus ergibt sich die Dichte

$$\rho = \frac{0{,}72\ \text{kg}}{0{,}001\ \text{m}^3} = 720\ \text{kg/m}^3$$

Bei einem festen Stoff ist die Volumenbestimmung schwieriger, falls der entsprechende Körper eine unregelmäßige Form hat. Abb. 4.17 zeigt, wie man vorgehen kann. Man taucht den Körper in Wasser und sieht nach, welches Wasservolumen von ihm verdrängt wird.

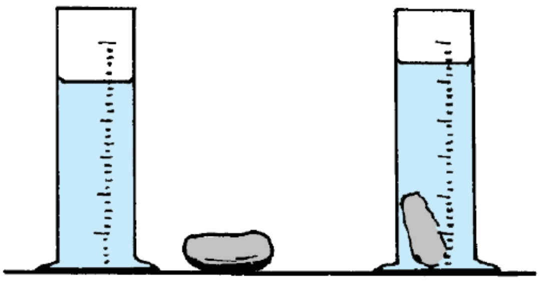


Abb. 4.17 Um das Volumen eines festen Körpers zu bestimmen, misst man das Volumen des verdrängten Wassers.

Bei der Bestimmung der Dichte von Gasen ist die Massenbestimmung das größere Problem. Wir wollen die Dichte von Luft bestimmen. Wir nehmen dazu einen dicht abschließbaren Behälter mit einem Volumen von 1 l und wägen ihn. Wir pumpen dann mit einer Vakuumpumpe die Luft heraus und wägen ihn wieder. Die Differenz der Ergebnisse der Wägungen muss die Masse der Luft darstellen, die sich zu Anfang im Behälter befand.

Aufgaben

1. 1,6 Liter einer Flüssigkeit werden gewogen. Man findet m = 1,3 kg. Wie groß ist die Dichte der Flüssigkeit?
2. Ein Granitpflasterstein wiegt 2,2 kg. Welches Volumen hat er?
3. Der Benzintank eines Autos fasst 40 l. Wie viel wiegt das Benzin des vollen Tanks?
4. Eine Kupferblechplatte, die 120 cm lang und 80 cm breit ist, wiegt 8,2 kg. Wie dick ist das Blech?
5. Welche Masse hat die Luft in eurem Wohnzimmer?

4.8 Wann ein Körper schwimmt und wann er sinkt

Ein Stück Holz, etwas Benzin oder ein Tropfen Öl schwimmen auf Wasser. Ein Stück Eisen, Kupfer oder Aluminium gehen unter, sie sinken. Und ein Tropfen Wasser in Wasser: Schwimmt er oder sinkt er? Eine unsinnige Frage, wirst du vielleicht denken. Man kann doch einen Tropfen Wasser von dem restlichen Wasser nicht unterscheiden! Es ist aber nicht schwer, den Tropfen unterscheidbar zu machen: Man färbt ihn einfach ein. Das Ergebnis: Er schwimmt nicht und er sinkt nicht; er bleibt in der Schwebe.

Ob ein Körper in einer Flüssigkeit schwimmt, hängt davon ab, wie schwer der Körper ist. Aber in welchem Sinn ist das „schwer“ hier gemeint? Sicher ist nicht die Masse gemeint. Ein Stück Holz schwimmt nämlich auf Wasser, egal, wie groß seine Masse ist. Worauf es ankommt, ist vielmehr die Dichte. Ein Körper schwimmt auf einer Flüssigkeit, wenn seine Dichte kleiner ist als die der Flüssigkeit. Ist seine Dichte größer, so geht er unter, und sind die Dichten von Körper und Flüssigkeit gleich, so bleibt er in der Schwebe.

(Wir haben hier das Wort Körper in einem weiten Sinn benutzt: Es kann sich dabei auch um eine Flüssigkeitsportion handeln.)

Wir prüfen die Behauptung noch einmal mit Wasser und Benzin. Ein Tropfen Wasser, den man in einen Behälter mit Benzin bringt, sinkt ab. Ein Tropfen Benzin in einen mit Wasser gefüllten Behälter gebracht, breitet sich auf der Wasseroberfläche aus; er schwimmt also.

Es handelt sich natürlich beide Male um dieselbe Erscheinung. Man sieht das besonders deutlich, wenn man das folgende Experiment macht: Man gießt in ein Becherglas mehrere Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte, z. B. Trichlorethylen, Wasser und Benzin. Die drei Flüssigkeiten schichten sich nun so, dass sich die Flüssigkeit mit der größten Dichte unten befindet, darüber liegt die mit der nächst kleineren Dichte usw., Abb. 4.18. Man kann außerdem einige feste Körper in das Glas tun. Ein Metallkörper sinkt ganz nach unten; ein Körper aus Hartgummi (ρ = 1200 kg/m^3) schwimmt auf dem Trichlorethylen, aber nicht auf dem Wasser; ein Körper aus einem leichteren Kunststoff (ρ = 900 kg/m^3) schwimmt auf dem Wasser, aber nicht auf dem Benzin; ein Holzkörper schließlich schwimmt ganz oben auf dem Benzin. Die sieben verschiedenen Stoffe ordnen sich also nach ihrer Dichte.

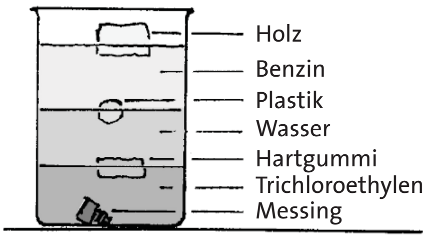


Abb. 4.18 Die sieben Körper (flüssige und feste) ordnen sich nach ihrer Dichte an.

Da Gase eine geringere Dichte haben als Flüssigkeiten, „schwimmen" alle Gase auf allen Flüssigkeiten. Ein Luftbläschen in Wasser oder ein Kohlenstoffdioxidbläschen in der Cola steigt nach oben.

Bisher haben wir nur danach gefragt, was für Körper auf einer Flüssigkeit schwimmen. Man kann dieselbe Frage auch für ein Gas stellen. Natürlich sinken alle flüssigen und festen Stoffe in Gasen: Wassertröpfchen oder feste Teilchen fallen in der Luft nach unten. Dagegen kann ein Gas auf einem anderen „schwimmen". Man nutzt diese Erscheinung in Ballons aus. Wenn man einen Ballon mit einem Gas füllt, dessen Dichte geringer ist als die von Luft, mit Wasserstoff zum Beispiel, so steigt der Ballon nach oben (vorausgesetzt allerdings, dass die Ballonhülle nicht zu schwer ist, denn die muss der Wasserstoff zusätzlich heben). Die lenkbaren Luftschiffe, die zu Anfang des vorigen Jahrhunderts recht verbreitet waren, funktionierten nach diesem Prinzip.

Wir fassen zusammen:

> Ein Körper, dessen Dichte kleiner ist als die seiner Umgebung, steigt nach oben. Ist seine Dichte größer als die der Umgebung, so sinkt er.

Aufgaben

1. Gibt es eine Flüssigkeit, auf der Eisen schwimmt? Begründung!
2. Ein Ballon wird mit Kohlenstoffdioxid gefüllt. Steigt er oder sinkt er? Begründung!

4.9 Der Zusammenhang zwischen Druck und Höhe in Flüssigkeiten und Gasen

Beim Tauchen im Schwimmbad spürt man einen „Druck in den Ohren"; ebenso, wenn man mit dem Aufzug in einem hohen Gebäude schnell nach oben oder nach unten fährt.

In beiden Fällen ändert sich der Druck, und die Ohren sind unser empfindlichstes Sinnesorgan für Druckänderungen.

Wir füllen Wasser in einen hohen Behälter, der an drei verschieden hoch gelegenen Stellen auf der Seite ein Loch hat, Abb. 4.19. Das Wasser spritzt aus allen drei Öffnungen heraus. Den Druck, der das Wasser heraustreibt, nennt man den Schweredruck, weil er durch das Gewicht des Wassers zustande kommt, also dadurch, dass das Wasser schwer ist. Der Wasserstrahl der unteren Öffnung schießt am weitesten heraus. Der Schwe-

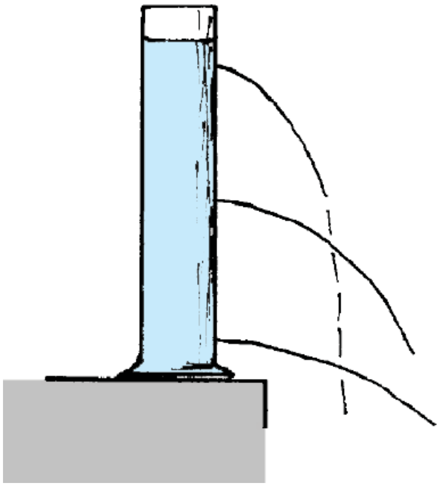


Abb. 4.19 Der Druck des Wassers nimmt nach unten hin zu.

redruck muss dort am größten sein. Der obere Strahl spritzt am wenigsten weit. Der Druck ist hier am geringsten. Der Schweredruck des Wassers nimmt also von oben nach unten zu.

Man kann diese Druckzunahme messen und stellt fest: Pro 10 m Wassertiefe wächst der Schweredruck um 1 bar. An der tiefsten Stelle des Meeres, also in rund 10 000 m Tiefe, beträgt der Druck demnach 1 000 bar. Du verstehst jetzt, warum Tauchkapseln, mit denen man in diese Tiefen vordringt, sehr dicke Wände haben müssen.

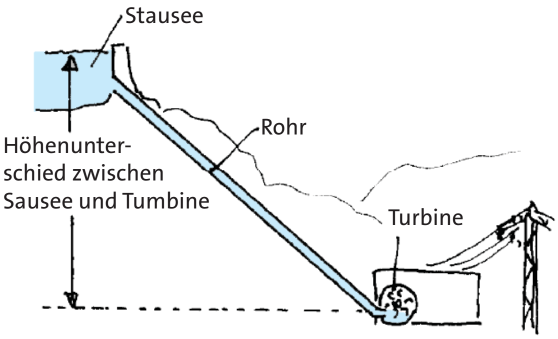


Abb. 4.20 Der Druck am Eingang der Turbine hängt vom Höhenunterschied zwischen Turbine und Stausee ab.

Wasserkraftwerke sind oft so angelegt, wie es Abb. 4.20 schematisch zeigt. Im Gebirge befindet sich in großer Höhe ein Stausee: ein Sammelbecken für Wasser, das aus verschiedenen Flüssen und Bächen kommt. Von diesem Stausee führen mehrere dicke Rohre ins Tal hinunter zum eigentlichen Kraftwerk: zu den Turbinen mit den Generatoren. Liegt der Stausee zum Beispiel 500 m höher als die Turbinen, so beträgt der Druck am Turbineneingang 50 bar.

Dieselbe Erscheinung, d. h. die Zunahme des Drucks mit der Tiefe, beobachtet man auch in der Erdatmosphäre, oder in anderen Worten: in dem „Luftmeer“, das die Erde umgibt. Auf dem „Meeresboden“, d. h. auf der Erdoberfläche, beträgt der Schweredruck etwa 1 bar. Er nimmt nach oben hin ab, und zwar in der Nähe der Erdoberfläche um etwa 1 mbar pro 10 m. Nach oben hin wird nicht nur der Druck geringer, sondern auch die Druckänderung pro Höhenunterschied (siehe auch Abschnitt 2.2).

> Der Schweredruck in Flüssigkeiten und Gasen nimmt nach unten hin zu.

5 IMPULS UND ENERGIE

5.1 Der Impuls als Energieträger

Wenn man sich körperlich anstrengt, verbraucht man Energie. Was ist hier mit „verbrauchen“ gemeint? Zum Beispiel, dass man viel essen muss, damit man die Anstrengung durchhalten kann. Mit dem Essen bekommt man Energie, und bei der körperlichen Anstrengung gibt man sie wieder ab. „Du verbrauchst viel Energie“ bedeutet also „Es fließt viel Energie durch dich hindurch, du nimmst viel Energie auf und gibst viel Energie ab“.

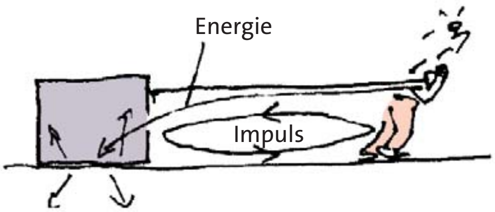


Abb. 5.1 Der Impuls fließt im geschlossenen Stromkreis. Die Energie fließt von Willys Muskeln zur Unterseite der Kiste.

Willy zieht in Abb. 5.1 eine Kiste über den Boden. (Er könnte die Kiste auch auf weniger anstrengende Art bewegen, aber dann könnten wir unser Problem nicht so gut diskutieren.) Er strengt sich an, er gibt Energie ab. Wo bleibt diese Energie? Sie geht zur Unterseite der Kiste, erzeugt dort Wärme und verteilt sich, zusammen mit der Wärme, in der Umgebung.

Wir wollen nun den Energietransport zwischen Willy und Kiste untersuchen. Der erste Punkt, der zu klären ist: Welches ist der Energieträger? Gleichzeitig mit einem Energiestrom fließt in dem Seil zwischen Willy und Kiste ein Impulsstrom. Wir vermuten daher, dass der gesuchte Energieträger der Impuls ist.

> Der Impuls ist ein Energieträger.

Wir sehen auch gleich, dass nicht jeder Impulsstrom von einem Energiestrom begleitet ist: Der Impulsstrom in Abb. 5.1 fließt, wie wir wissen, von der Kiste durch die Erde zurück zur Person. Die Energie geht von der Kistenunterseite aus ihre eigenen Wege. Der zurückfließende Impuls trägt also keine Energie.

Wovon hängt es nun ab, wie groß der Energiestrom ist? Oder allgemeiner formuliert: Wie müssen wir es anstellen, wenn wir möglichst viel Energie mit einem Seil oder einer Stange übertragen wollen?

Wenn wir ein gespanntes Seil an den Wänden festhaken, Abb. 5.2, so fließt ein Impulsstrom, aber sicher kein Energiestrom, denn es wird nichts erwärmt, und es wird nichts bewegt. Welches ist der Unterschied zwischen den Seilen in Abb. 5.1 und Abb. 5.2? Das erste Seil bewegt sich, das zweite nicht. Man sieht also, dass es beim Energietransport auf die Geschwindigkeit ankommt, mit der sich die Impulsleitung bewegt.

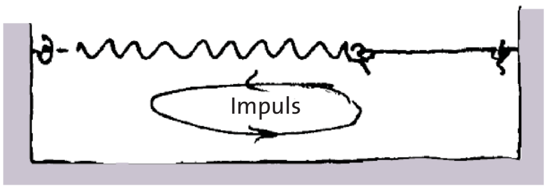


Abb. 5.2 Es fließt nirgends ein Energiestrom, obwohl ein Impulsstrom fließt.

Außerdem hängt die Stärke des Energiestroms von der Stärke des Impulsstroms ab, denn wenn das Seil nicht unter mechanischer Spannung steht, wird man damit keine Energie übertragen. Wir haben damit ein erstes Ergebnis:

> Die Stärke des Energiestroms P durch ein Seil hängt ab
> - von der Stärke F des Impulsstroms im Seil;
> - von der Geschwindigkeit v des Seils.

Wir wollen klären, wie der Zusammenhang quantitativ aussieht. Durch was für eine Gleichung sind die drei Größen P, F und v miteinander verknüpft?

Die Abhängigkeit der Energiestromstärke P von der Impulsstromstärke F ist leicht zu finden. Abb. 5.3 zeigt von oben, wie zwei völlig gleichartige Kisten über den Boden gezogen werden.

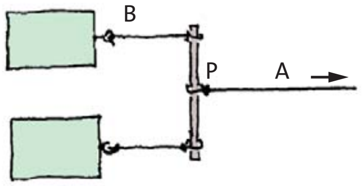


Abb. 5.3 Zwei Kisten werden über den Boden gezogen. Ansicht von oben

Wir vergleichen die beiden Seilstücke A und B. Beide bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit. Sowohl der Impulsstrom als auch der Energiestrom teilen sich im Knotenpunkt P gleichmäßig auf: Der Impulsstrom ist in Seil B halb so stark wie in A, der Energiestrom ebenso. Bei gleicher Geschwindigkeit ist also die Energiestromstärke zur Impulsstromstärke proportional:

$$P \sim F.$$

Um den Zusammenhang zwischen P und v zu finden, machen wir ein Experiment. Eine Kiste wird mithilfe eines „Flaschenzuges" gezogen, Abb. 5.4.

Wir vergleichen die Seilstücke A und B. Zunächst zum Energiestrom: Die ganze Energie, die von rechts in Seil B hineinfließt, geht von der Umlenkrolle aus durch Seil A weiter. In Seil C

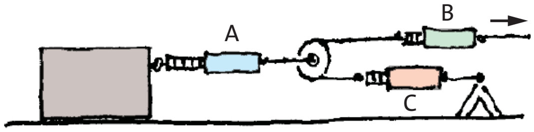


Abb. 5.4 In A ist die Stromstärke doppelt so groß wie in B. Die Geschwindigkeit von A ist halb so groß wie die von B.

kann keine Energie fließen, denn C bewegt sich nicht. Wir haben also

$$P_A = P_B.$$

Als nächstes vergleichen wir die Geschwindigkeiten von A und B. Wenn sich die Kiste, und damit Seil A, um ein bestimmtes Stück nach rechts bewegt, so bewegt sich das rechte Ende von B um den doppelten Betrag dieses Stücks nach rechts. Nehmen wir an, die Kiste bewege sich um 10 cm, dann bewegt sich auch die Umlenkrolle um 10 cm. Wäre nun Seil B nicht über die Rolle gelegt, sondern am rechten Ende von A befestigt, so würde sich B ebenfalls um 10 cm nach rechts bewegen. Wegen der Rolle wird aber Seil C auch um 10 cm kürzer, und diese 10 cm von Seil C kommen Seil B zugute. B wird also um 20 cm länger. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeit von B doppelt so groß ist wie die von A. Es ist also:

$$v_B = 2\,v_A.$$

Schließlich vergleichen wir die Impulsströme in A und B. Das können wir nur mit einer Messung machen. Es zeigt sich, dass die Impulsstromstärke in B gerade halb so groß ist wie die in A. (In C ist sie übrigens genauso groß wie in B, sodass die Knotenregel erfüllt ist.) Wir können also schreiben:

$$F_A = 2\,F_B.$$

Alle diese Ergebnisse zusammen werden korrekt beschrieben, wenn man ansetzt:

$$P \sim v \cdot F.$$

Denn diese Proportionalität sagt zum einen, dass P zu F proportional ist, wenn die Geschwindigkeit konstant gehalten wird. Zum anderen sagt sie: Wenn man v verdoppelt und gleichzeitig F halbiert, so bleibt P konstant, und genau das haben wir in unserem Experiment mit der Umlenkrolle gefunden.

> Überträgt man Energie mit dem Energieträger Impuls, so ist die Energiestromstärke proportional zur Impulsstromstärke und zur Geschwindigkeit, mit der sich die Leitung bewegt.

Um aus dieser Proportionalität eine Gleichung zu machen, müsste man eigentlich einen Proportionalitätsfaktor einführen. Nun sind glücklicherweise die SI-Maßeinheiten der drei beteiligten Größen so gewählt, dass einfach gilt:

$$P = v \cdot F .$$

Dies ist das gesuchte Ergebnis. Wir können damit die Stärke des Energiestroms in unserem Seil berechnen, wenn wir die Impulsstromstärke im Seil und die Geschwindigkeit des Seils kennen.

Ein Beispiel: Wir ziehen an einem Seil, in das ein Kraftmesser eingebaut ist. Der Kraftmesser zeigt 120 N an, das Seil bewegt sich mit 0,5 m/s. Die Energiestromstärke ergibt sich zu:

$$P = v \cdot F = 0.5\ \text{m/s} \cdot 120\ \text{N} = 60\ \text{W}.$$

Beachte, dass man die Geschwindigkeit in m/s und die Impulsstromstärke in N einsetzen muss, damit die Energiestromstärke in der SI-Einheit Watt herauskommt.

Die Formel

$$P = v \cdot F$$

lässt sich umformen. Man erhält eine Gleichung, die für manche Probleme handlicher ist. Wir ersetzen P durch E/t und v durch s/t:

$$\frac{E}{t} = \frac{s}{t} \cdot F .$$

und multiplizieren rechts und links mit t. Es ergibt sich:

$$E = s \cdot F .$$

Die Gleichung sagt uns zum Beispiel: Wenn man gegen eine Stange drückt und die Stange dabei um das Wegstück s verschiebt, so fließt die Energiemenge $s \cdot F$ durch die Stange. F ist hierbei die Stärke des Impulsstroms, der beim Schieben durch die Stange fließt. Ein Beispiel: Wir ziehen so an einem Seil, dass dabei ein Impulsstrom von 120 N fließt und sich das Seil um 2 m bewegt. Wie viel Energie wird dabei durch das Seil übertragen? Wir verwenden unsere neue Formel. Mit $F = 120$ N und $s = 2$ m wird

$$E = s \cdot F = 2\ \text{m} \cdot 120\ \text{N} = 240\ \text{Nm} = 240\ \text{J} .$$

Aufgaben

1. Ein Traktor zieht einen Anhänger auf ebener Straße mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h. Durch die Anhängerkupplung fließt ein Impulsstrom von 900 N. Wie groß ist der Energieverbrauch des Anhängers? (Wie stark ist der Energiestrom vom Traktor zum Anhänger?) Wo bleibt der Impuls, der zum Anhänger fließt, wo bleibt die Energie?
2. Ein Lastwagen zieht einen Anhänger auf ebener Straße von einer Stadt zur anderen. Die Entfernung zwischen den Städten beträgt 35 km. Durch die Anhängerkupplung fließt ein Impulsstrom von 900 N. Wie viel Energie ist insgesamt vom Lastwagen zum Anhänger geflossen?
3. Der Antriebsriemen einer Maschine läuft mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s. Der mit dem Riemen übertragene Energiestrom hat eine Stärke von 800 W. Mit welcher Kraft zieht der Riemen an der Riemenscheibe? (Wie stark ist der Impulsstrom im Riemen?)
4. Ein Kran hebt eine Last von 50 kg mit einer Geschwindigkeit von 0,8 m/s. Wie groß ist der Energiestrom durch das Kranseil? Die Last wird 5 m hoch gehoben. Wie lange dauert der Vorgang? Wie viel Energie fließt während dieser Zeit durch das Seil?

5.2 Mechanische Energiespeicher

a) Elastisch verformbare Körper als Energiespeicher

Wir spannen eine lange, starke Feder, Abb. 5.5. Das ist anstrengend, denn dazu wird Energie gebraucht. Wir betrachten das rechte Ende der Feder (die Stelle A in Abb. 5.5). Dieses Federende steht unter mechanischer Spannung, d. h. darin fließt ein Impulsstrom F, und es bewegt sich mit einer Geschwindigkeit v. Nach unserer Formel P

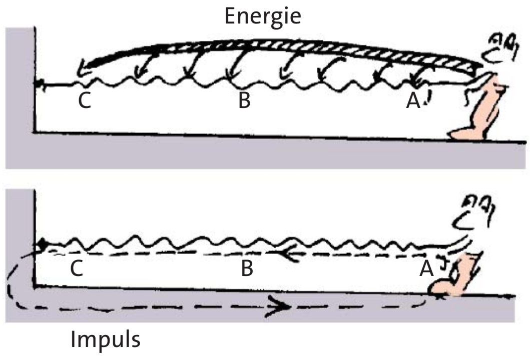


Abb. 5.5 Beim Spannen der Feder fließt über das rechte Ende Energie in die Feder hinein.

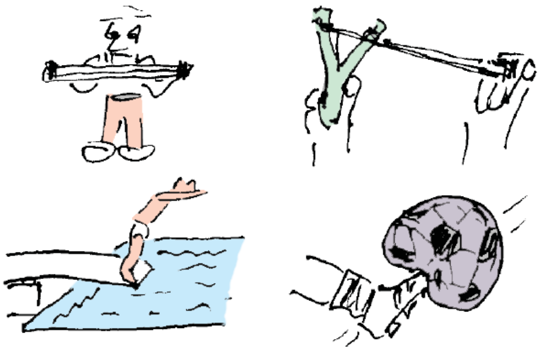


Abb. 5.6 In einem gespannten Expander, in einer gespannten Steinschleuder, in einem verbogenen Sprungbrett und in einem eingedellten Fußball ist Energie gespeichert.

$= v \cdot F$ fließt darin auch ein Energiestrom. Wir betrachten nun das linke Ende der Feder (die Stelle C). Der Impulsstrom ist hier derselbe wie bei A. Da sich C aber nicht bewegt, fließt hier kein Energiestrom. Die Energie, die bei A in die Feder fließt, kommt also bei C nicht wieder heraus. Sie wird in der Feder gespeichert.

Wir können die Ströme an anderen Stellen der Feder prüfen, z. B. bei B, in der Mitte der Feder. Der Impulsstrom ist hier wieder derselbe wie bei A und bei C. Die Geschwindigkeit der Federmitte ist halb so groß wie die von Punkt A. Deshalb ist auch der Energiestrom nur noch halb so stark wie der, der bei A in die Feder hineinfließt. Das ist einleuchtend: Die Hälfte der Energie wird in der rechten Hälfte der Feder gespeichert, und die andere Hälfte der Energie fließt weiter in die linke Federhälfte. Man kann diese Überlegung weiterführen: In jedem Drittel der Feder wird gerade ein Drittel der Energie gespeichert, in jedem Viertel der Feder wird ein Viertel der Energie gespeichert usw. Oder kurz: Die Energie verteilt sich gleichmäßig auf die gesamte Länge der Feder.

Wenn man eine Feder zusammendrücken kann, ohne dass sie seitlich ausweicht, kann man auch auf diese Art Energie in ihr speichern.

> Eine Feder ist ein Energiespeicher. Je stärker die Feder verlängert oder verkürzt worden ist, desto mehr Energie enthält sie.

Diese Überlegungen gelten nicht nur für Federn, sondern auch für andere elastisch verformbare Gegenstände. Ein gedehnter Expander enthält ebenso Energie wie eine gespannte Steinschleuder, ein verbogenes Sprungbrett oder ein eingedrückter Fußball, Abb. 5.6.

b) Bewegte Körper als Energiespeicher

Wir laden einen gut gelagerten Wagen mit Impuls, wie wir es schon oft gemacht haben, Abb. 5.7. Allerdings wissen wir jetzt, dass in dem Seil nicht nur Impuls, sondern auch Energie fließt. Die Energie kann nun den Wagen genauso wenig verlassen wie der Impuls. Beim Ziehen wird demnach im Wagen sowohl Impuls als auch Energie angehäuft.

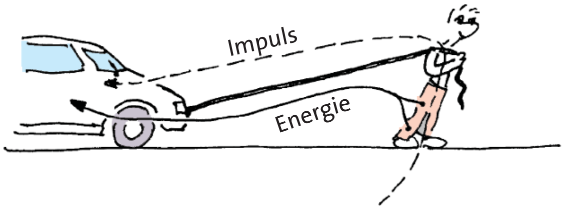


Abb. 5.7 Beim Beschleunigen fließt außer Impuls noch Energie in den Wagen.

> Ein bewegter Körper enthält Energie. Je größer seine Geschwindigkeit ist, desto mehr Energie enthält er.

Lässt man einen sich bewegenden Wagen ausrollen, so fließt sein Impuls in die Erde ab. Die Energie nimmt einen anderen Weg. Sie wird zur Wärmeerzeugung verwendet. Wärme wird überall dort produziert, wo Reibung stattfindet. Die Energie verteilt sich dabei in der Umgebung: zum Teil in der Erde, zum Teil im Wagen und in der Luft.

a)

b)

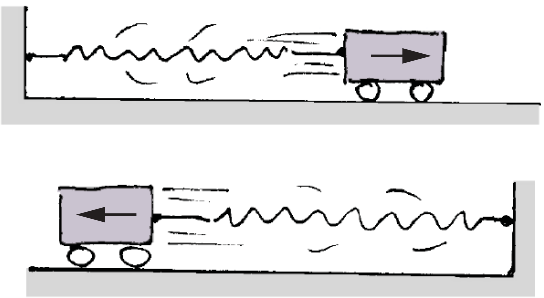


Abb. 5.8 Ein sich bewegender Wagen gibt seine Energie an eine Feder ab. (a) Der Wagen bewegt sich nach rechts. (b) Der Wagen bewegt sich nach links.

Man kann die in einem sich bewegenden Wagen enthaltene Energie in eine Feder bringen und dort speichern: Man lässt den Wagen eine Feder spannen, Abb. 5.8. Der Wagen kommt dabei zum Stillstand. Man kann nun die Feder auf zwei Arten spannen: Entweder man befestigt ihr linkes Ende an der Wand und lässt das rechte Ende vom Wagen nach rechts ziehen, oder man befestigt das rechte Ende an der Wand und lässt das linke nach links ziehen. Das Ergebnis ist beide Male dasselbe: eine gespannte, mit Energie geladene Feder. Im ersten Fall kam die Energie von einem Wagen, der positiven Impuls hatte, und im zweiten von einem Wagen, der negativen Impuls hatte. Beide Wagen hatten aber offensichtlich positive Energie.

> Die Energie eines bewegten Körpers ist immer positiv, gleichgültig, in welche Richtung er sich bewegt.

c) Das Schwerefeld als Energiespeicher

Ein schwerer Gegenstand wird nach oben gezogen, Abb. 5.9. Wieder fließt in dem Seil außer Impuls noch Energie. Der Impuls kommt, wie wir wissen, aus der Erde über das Schwerefeld in den

Abb. 5.9 Beim Hochziehen des Gegenstandes wird Energie im Schwerefeld gespeichert.

Körper. Man kann sich das Schwerefeld als eine unsichtbare Feder vorstellen, die an dem Körper zieht. Genauso, wie man nun beim Spannen einer Feder Energie in der Feder speichert, wird hier Energie im Schwerefeld gespeichert, wenn man einen Gegenstand hebt. Lässt man den Gegenstand wieder herunter, so bekommt man die Energie aus dem Schwerefeld zurück. Zum Heben eines schweren Gegenstandes braucht man mehr Energie als zum Heben eines leichten. Man speichert also im Feld umso mehr Energie, je schwerer der Gegenstand ist, den man hebt.

> Das Schwerefeld ist ein Energiespeicher. Je höher man einen Gegenstand hebt und je schwerer der Gegenstand ist, desto mehr Energie steckt man ins Schwerefeld.

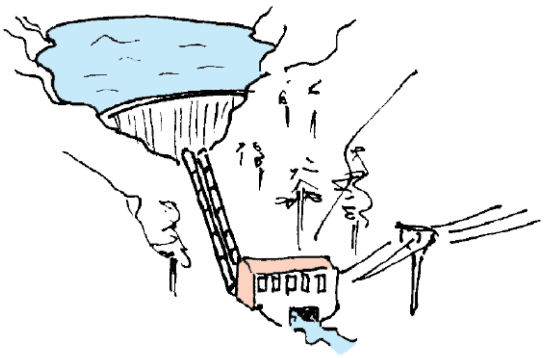


Abb. 5.10 Wasserkraftwerk. Beim Herunterfließen in den Rohren nimmt das Wasser Energie aus dem Schwerefeld auf. In der Turbine gibt es die Energie wieder ab.

Die Energie des Schwerefeldes wird in Wasserkraftwerken nutzbar gemacht, Abb. 5.10.

An hohen Stellen eines Gebirges wird Wasser von Bächen und Flüssen gesammelt und durch Rohre nach unten geleitet. Beim Hinunterfließen nimmt das Wasser Energie aus dem Schwerefeld auf.

Es strömt dann durch die Turbine des Kraftwerks und gibt hier seine Energie wieder ab. Es fließt also Energie mit dem Energieträger „Wasser“ in die Turbine. Von der Turbine geht die Energie weiter zum Generator mit dem Energieträger Drehimpuls.

5.3 Die verwickelten Wege von Energie und Impuls

Wir untersuchen im Folgenden zwei Bewegungsvorgänge: die Bewegung eines nach oben geworfenen Steins, Abb. 5.11, und die Bewegung eines zwischen zwei Federn hin- und herschwingenden Körpers, Abb. 5.12. In beiden Fällen stellen wir die Fragen:

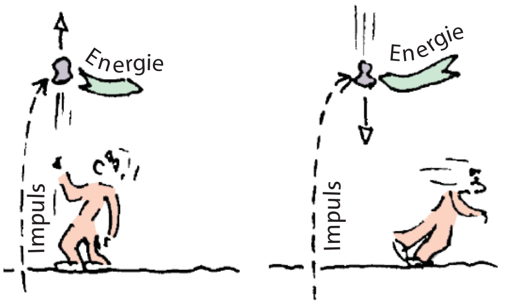


Abb. 5.11 Der Weg von Energie und Impuls bei einem nach oben geworfenen Stein

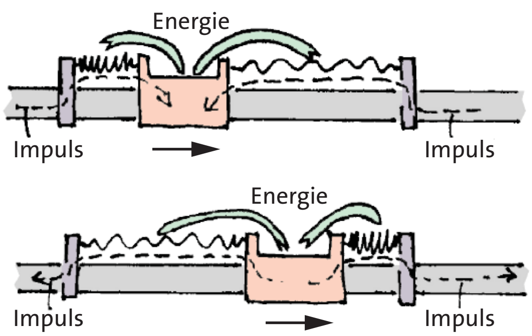


Abb. 5.12 Der Weg von Energie und Impuls bei einem schwingenden Gegenstand

- Welchen Weg nimmt die Energie?
- Welchen Weg nimmt der Impuls?

a) Der nach oben geworfene Stein

Die Energie

Beim Abwerfen geht Energie aus Lillys Muskeln in den Stein. Während des Aufsteigens fließt die Energie ins Schwerefeld. Im oberen Umkehrpunkt ist sie ganz aus dem Stein heraus, und beim Herunterfallen fließt sie aus dem Feld zurück in den Stein. Beim Auftreffen auf der Erde wird Wärme erzeugt. Die Energie verteilt sich mit der Wärme in der Umgebung: im Stein, in der Erde und in der Luft.

Der Impuls

Beim Abwerfen „pumpt“ Lilly negativen Impuls aus der Erde in den Stein. Während des Aufsteigens fließt aus der Erde durch das Schwerefeld (positiver) Impuls in den Stein, der negative Impuls des Steins nimmt dadurch ab. Im Umkehrpunkt ist der ganze negative Impuls des Steins kompensiert. Der Zufluss von positivem Impuls hört hier aber nicht auf. Daher setzt sich der Stein in die positive Richtung, d. h. nach unten, in Bewegung, sein (positiver) Impuls nimmt beim Fallen zu. Beim Aufschlag gibt er ihn wieder an die Erde ab.

b) Der schwingende Gegenstand

Der Luftkissengleiter in Abb. 5.12 führt eine Hin- und Herbewegung aus, eine sogenannte Schwingung. Dir sind sicher andere Schwingungsbewegungen begegnet. Bei vielen dieser Vorgänge sind die Wege von Energie und Impuls ganz ähnlich wie in Abb. 5.12. Wir wollen daher den Gleiter in Abb. 5.12 genauer betrachten. Wir verschieben den Körper etwas aus seiner Gleichgewichtslage nach links und lassen ihn los.

Die Energie

Im Augenblick des Loslassens sind beide Federn mit Energie geladen: die linke, weil sie zusammengedrückt ist, die rechte, weil sie gedehnt ist. Der Gleiter setzt sich nach rechts in Bewegung. Dabei bekommt er Energie aus beiden Federn, denn beide Federn entspannen sich. Ist er in der Mitte angelangt, so haben beide Federn ihre

Energie abgegeben; die ganze Energie steckt im Körper. Der Körper gleitet weiter nach rechts und wird dabei langsamer: Er gibt seine Energie wieder an die beiden Federn ab. Im rechten Umkehrpunkt steckt die ganze Energie wieder in den Federn, und der ganze Vorgang beginnt nun, in umgekehrter Richtung abzulaufen.

Der Impuls

Im Augenblick des Loslassens steht die linke Feder unter Druck-, die rechte unter Zugspannung. In der linken fließt also ein Impulsstrom nach rechts, in der rechten nach links. Insgesamt fließen also aus der Erde zwei Impulsströme zum Körper hin. Der Impuls des Körpers nimmt daher zu, und zwar so lange, bis er die Mitte erreicht hat. Jetzt sind die Federn entspannt, der Impulsstrom hat aufgehört zu fließen. Sobald sich aber der Gleiter über die Mitte hinaus bewegt, beginnen die Federn wieder, sich zu spannen, allerdings steht nun die rechte Feder unter Druck- und die linke unter Zugspannung. Der Impuls fließt also in die entgegengesetzte Richtung wie vorher: aus dem Körper nach beiden Seiten heraus und in die Erde hinein.

Aufgaben

1. Ein Eisenbahnwagen fährt gegen einen elastischen Federpuffer. Welchen Weg nehmen Energie und Impuls?
2. Ein Ball fällt auf die Erde und springt wieder hoch. Welchen Weg gehen Energie und Impuls?
3. Ein Gegenstand ist über eine Gummischnur an der Decke aufgehängt, sodass er auf- und abschwingen kann. Beschreibe den Weg von Energie und Impuls.

6 DER IMPULS ALS VEKTOR

6.1 Vektoren

Dichter Nebel in einer Gegend mit viel Schiffsverkehr. Kapitän Amundsen bekommt vom Funker Position und Geschwindigkeit der Schiffe in der Umgebung der Gigantic durchgesagt: „In einer Entfernung von 5,6 Seemeilen in Richtung Nordnordost von der Gigantic fährt ein Tanker mit einer Geschwindigkeit von 35 Knoten." Reicht diese Angabe aus, damit Kapitän Amundsen einen Zusammenstoß vermeiden kann? Natürlich nicht, Abb. 6.1. „In welche Richtung fährt er?", fragt Amundsen. Er weiß, dass es gefährlich wird, wenn der Tanker in Richtung West fährt.

Er müsste dann unbedingt ein Ausweichmanöver einleiten. Fährt der Tanker dagegen in Richtung Ost, so besteht keine Gefahr. Um die Bewegung eines Körpers (hier: des Tankers) eindeutig zu beschreiben, muss man angeben:

- wie schnell sich der Körper bewegt, z. B. 65 km/h;
- in welche Richtung sich der Körper bewegt, z. B. in Richtung Ost.

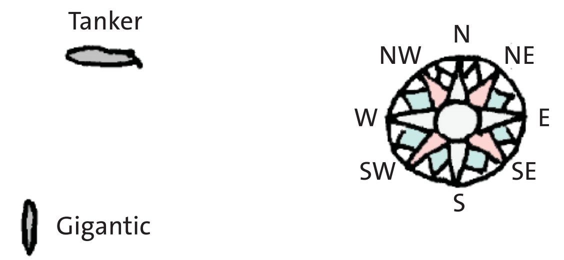


Abb. 6.1 Die Positionen der Gigantic und eines Tankers. Der Tanker fährt in Richtung Ost. Es besteht keine Gefahr.

Beide Angaben gehören zur Geschwindigkeit. Durch die Angabe „65 km/h" allein ist die Geschwindigkeit noch nicht hinreichend bestimmt. Zur Festlegung einer Geschwindigkeit gehört immer die Bewegungsrichtung.

Man sagt, die Geschwindigkeit habe einen Betrag und eine Richtung. In unserem Fall ist

- Betrag der Geschwindigkeit: 35 Knoten = 65 km/h;
- Richtung der Geschwindigkeit: Ost.

Es gibt andere Größen, deren Werte erst durch Angabe von Betrag und Richtung eindeutig festliegen. Der Impuls gehört zu diesen Größen.

Beide Autos in Abb. 6.2 haben einen Impuls von 2000 Hy. Trotzdem sind die Impulse nicht gleich. Die Autos bewegen sich nämlich nicht in dieselbe Richtung. Auto A fährt in x-Richtung, Auto B quer dazu.

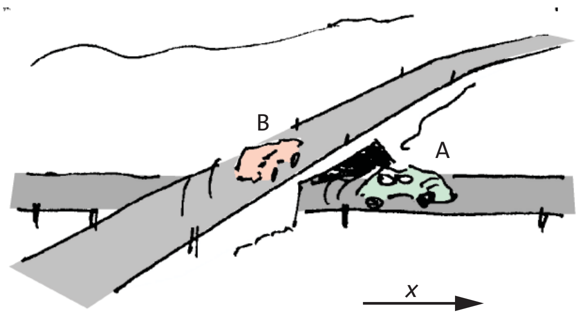


Abb. 6.2 Die Impulse der beiden Autos sind nicht gleich.

Es ist wie bei der Geschwindigkeit: Um den Impuls eines Körpers eindeutig zu kennzeichnen, muss man Betrag und Richtung angeben, also in unserem Beispiel:

Impuls von Auto A:
- Betrag: 2000 Hy
- Richtung: x-Richtung

Impuls von Auto B
- Betrag: 2000 Hy
- Richtung: quer zur x-Richtung

Zwei Impulse sind nur dann gleich, wenn sie sowohl im Betrag als auch in der Richtung übereinstimmen.

Physikalische Größen, die auf diese Art festgelegt werden, nennt man Vektoren.

> Ein Vektor wird durch seinen Betrag und seine Richtung festgelegt.
> Geschwindigkeit und Impuls sind Vektoren.

Die „normalen" physikalischen Größen, d. h. diejenigen, deren Werte durch eine einzige Zahlenangabe festgelegt sind, nennt man Skalare.

Die Massenangabe

$m = 5$ kg

ist eindeutig. Eine Richtungsangabe wäre hier sinnlos. Die Masse ist also ein Skalar. Andere Beispiele für Skalare sind die Energie, die elektrische Stromstärke und die Temperatur.

Wie kann man jemandem den Wert einer Vektorgröße mitteilen, etwa den Impuls eines Körpers? Zum Beispiel so:
- Betrag des Impulses: 200 Hy;
- Richtung des Impulses: 35° gegen die x-Achse.

Es gibt aber eine noch handlichere Methode der Beschreibung des Impulses (oder jeder anderen Vektorgröße): durch eine Zeichnung. Zunächst legt man den Maßstab fest, also etwa:

1 cm in der Zeichnung entspricht 50 Hy.

Man kann nun den Impuls durch einen Pfeil darstellen. Die Länge des Pfeils gibt den Impulsbetrag an, die Richtung des Pfeils die Impulsrichtung. In Abb. 6.3 sind die Impulse von drei Körpern A, B und C dargestellt.

Um uns das Leben leichter zu machen, geben wir den drei Impulsorten in Abb. 6.3 unterschiedliche Namen: Den von Körper A nennen wir 0°-Impuls, weil der Impulspfeil mit der x-Achse einen Winkel von 0° bildet; den von Körper B nennen wir 45°-Impuls, denn der entsprechende Impulspfeil bildet mit der x-Achse einen Winkel von 45°; und den von Körper C nennen wir entsprechend 270°-Impuls.

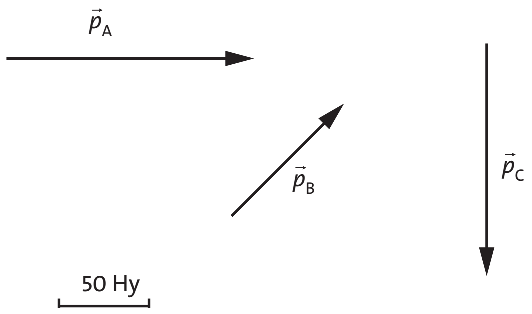


Abb. 6.3 Die Impulse von drei Körpern A, B und C in Pfeildarstellungs

Dass eine Größe ein Vektor ist, kann man im Symbol der Größe zum Ausdruck bringen: Man bringt über das Buchstabensymbol der Größe einen Pfeil an. So ist das Symbol des Geschwindigkeitsvektors $\vec{v}$ und das des Impulsvektors $\vec{p}$. In Abb. 6.3 wurden diese Bezeichnungen benutzt.

Aufgaben

1. Stelle die folgenden Impulswerte grafisch dar.
   Körper P: Impulsbetrag: 20 Hy
   Impulsrichtung: 270° gegen die x-Richtung
   Körper Q: Impulsbetrag: 1 200 Hy
   Impulsrichtung: 10° gegen die x-Richtung
2. Früher hatten wir ausschließlich Bewegungen parallel zu einer einzigen Achse betrachtet. Dabei traten positive und negative Impulswerte auf. Stelle die Impulswerte $p_1 =$ 3,5 Hy und $p_2 = -4{,}5$ Hy als Pfeile dar.
3. Wie sind Betrag und Richtung der Impulse, die in Abb. 6.4 als Pfeile dargestellt sind?

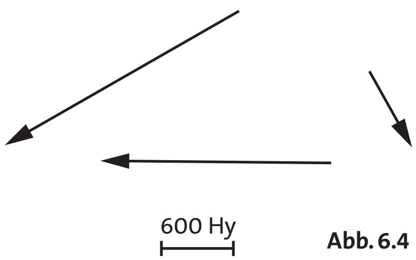


Abb. 6.4 Zu Aufgabe 3

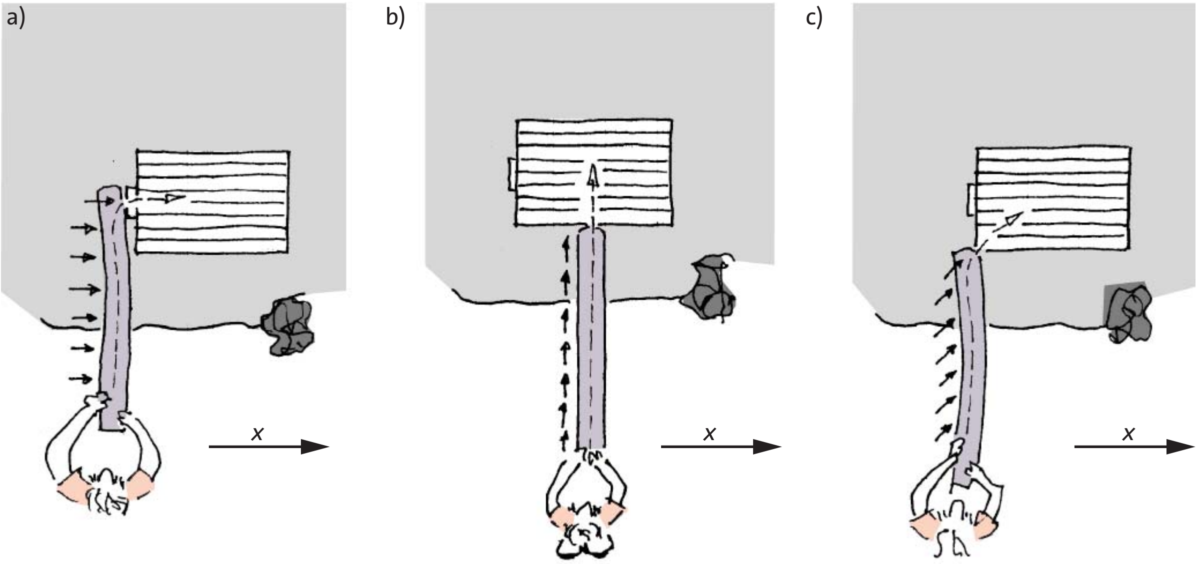


Abb. 6.5 Zum Floß hin, d. h. in der Stange von unten nach oben, fließt (a) 0°-Impuls, (b) 90°-Impuls und (c) 45°-Impuls.

6.2 Die Richtung des Stroms und die Richtung dessen, was strömt

Lilly steht am Rand eines Teiches und versucht, mithilfe einer langen Stange ein Floß zu bewegen. Abb. 6.5a bis Abb. 6.5c zeigen drei verschiedene Szenen, von oben gesehen. Wir wollen beschreiben, was passiert.

Um die Aufgabe zu erleichtern, haben wir die x-Richtung eingezeichnet. Wir geben die Impulsrichtung immer gegen diese Richtung an.

In Abb. 6.5a drückt Lilly das Floß nach rechts, also in Richtung der positiven x-Achse. Wir nehmen an, sie drückt so, dass pro Sekunde 150 Huygens zum Floß strömen. Die Impulsstromstärke beträgt also 150 Hy/s = 150 N. In Abb. 6.5b drückt sie das Floß von sich weg, zur Mitte des Teiches hin. Wieder drückt sie so, dass 150 Huygens pro Sekunde zum Floß gelangen. Und auch in Abb. 6.5c drückt sie mit 150 N, diesmal aber schräg nach rechts hinten.

Obwohl in allen drei Fällen die gleiche Zahl von Huygens pro Sekunde fließen, unterscheiden sich die Impulsströme. Denn das, was fließt, ist nicht dasselbe.

Im ersten Fall bekommt das Floß 0°-Impuls. Also ist auch durch die Stange 0°-Impuls geströmt. Im zweiten Fall bekommt das Floß 90°-Impuls. Also muss durch die Stange 90°-Impuls fließen. Und im dritten Fall geht 45°-Impuls durch die Stange.

Der Impuls, der von Lilly zum Floß gelangt, ist durch die Pfeile links neben der Stange angedeutet. Du kannst dir jeden Pfeil als eine Impulsportion vorstellen, die sich von Lilly zum Floß bewegt.

Die lange, gestrichelte Linie bezeichnet den Weg, den der Impuls nimmt.

Du siehst also: Wir sind bei der Impulsstromstärke in derselben Lage wie beim Impuls selbst. Zur Festlegung genügt eine Zahlenangabe nicht. Die Stärke des Impulsstroms liegt erst fest, wenn man außer dem Betrag (hier 150 N) die Richtung des fließenden Impulses angibt (0° oder 90° oder 45°):

> Die Impulsstromstärke ist ein Vektor.

Wie jeden anderen Vektor, so können wir auch die Impulsstromstärke durch einen Pfeil darstellen. Dabei bedeutet:

- Länge des Pfeils: Betrag der Impulsstromstärke;
- Richtung des Pfeils: Richtung des Impulses, der durch die Leitung strömt.

Als Symbol des Impulsstrom-Vektorpfeiles benutzt man $\vec{F}$.

Abb. 6.6 zeigt die Stromstärkevektoren, die zu den Abb. 6.5a–c gehören.

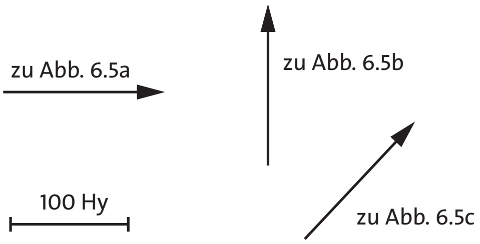
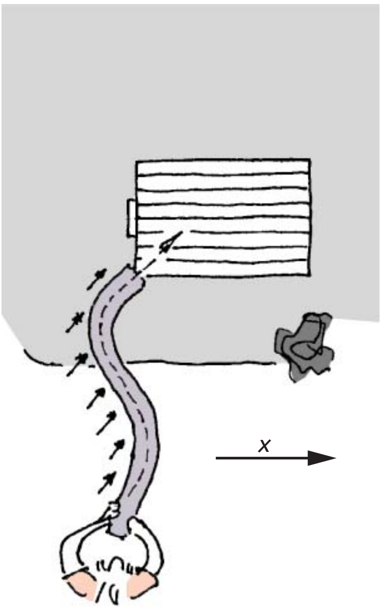


Abb. 6.6 Stromstärkevektoren für den Impuls, der in den Abbildungen 6.5a-c zum Floß strömt.

Wir betrachten Abb. 6.7 und vergleichen mit Abb. 6.5c. Auch in Abb. 6.7 fließt 45°-Impuls zum Floß — im Unterschied zu Abb. 6.5c aber nicht durch eine gerade, sondern durch eine gebogene Stange. Der Impuls muss hier durch eine S-Kurve fließen. Also: In beiden Abbildungen fließt derselbe Impuls, und in beiden Abbildungen fließen 150 Hy/s. Aber einmal fließt dieser Impuls durch einen geraden Leiter und einmal durch einen gebogenen. Die Vektorpfeile, die Abb. 6.5c und Abb. 6.7 entsprechen, sind daher gleich.

Abb. 6.7 Zum Floß strömt 45°-Impuls durch eine gebogene Stange.

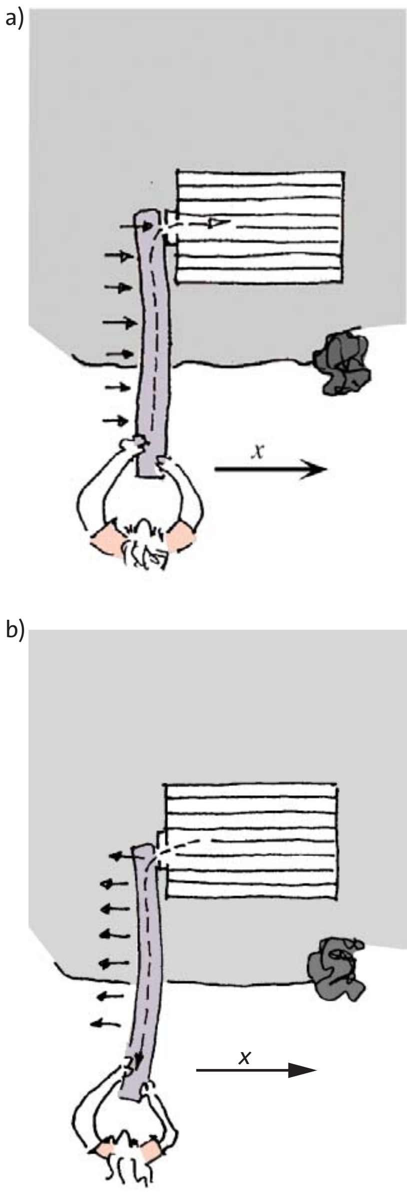


Verwechsle nicht die Richtung des Weges mit der Richtung des transportierten Impulses.

Wir haben jeden der drei Vorgänge der Abb. 6.5a bis Abb. 6.5c dadurch beschrieben, dass wir gesagt haben, was für Impuls und wie viel davon von der Erde zum Floß fließt. Wir können diese Vorgänge aber auch dadurch beschreiben, dass wir sagen, welcher Impuls vom Floß zur Erde geht. Beide Beschreibungsweisen sind gleichwertig.

Abb. 6.8 zeigt die beiden Beschreibungsweisen. Abb. 6.8a zeigt, dass 0°-Impuls zum Floß hin geht; Abb. 6.8b zeigt, dass 180°-Impuls vom Floß weg strömt.

Abb. 6.8 Derselbe Vorgang unterschiedlich beschrieben. (a) 0°-Impuls geht von der Erde zum Floß; (b) 180°-Impuls geht vom Floß zur Erde.



Der Stromstärke-Vektorpfeil muss bei den beiden Beschreibungsweisen entgegengesetzte Richtung haben.

Aufgaben

1. In der Stange zwischen Traktor und Anhänger fließt ein Impulsstrom von 300 N, Abb. 6.9. Was für Impuls fließt vom Traktor zum Anhänger? Stelle die Impulsstromstärke durch einen Vektorpfeil dar. Beschreibe denselben Vorgang dadurch, dass du angibst, wie viel und was für Impuls durch die Stange vom Anhänger zum Traktor fließt.
2. Jemand drückt einen Wagen mithilfe einer spiralförmigen Stange in die positive x-Richtung, Abb. 6.10. Es fließt ein Impulsstrom von 25 N.
   a) Was für Impuls strömt zum Wagen hin?
   b) Zeichne in Abb. 6.10 den Weg des Impulses ein.
   c) Zeichne den Stromstärke-Vektorpfeil.
3. Ein Apfel fällt vom Baum, Abb. 6.11. In den Apfel fließt Impuls hinein. (Er kommt über das Schwerefeld aus der Erde.) Der Apfel wiegt 300 g.
   a) Wie stark ist der Impulsstrom?
   b) Was für Impuls fließt in den Apfel? (Winkelangabe in einer senkrechten Ebene).
   c) Zeichne den Impulsstromstärke-Vektorpfeil.

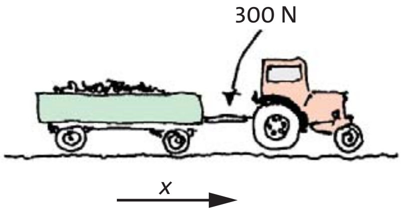


Abb. 6.9 Zu Aufgabe 1

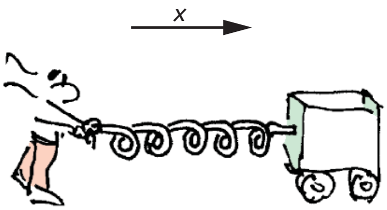


Abb. 6.10 Zu Aufgabe 2

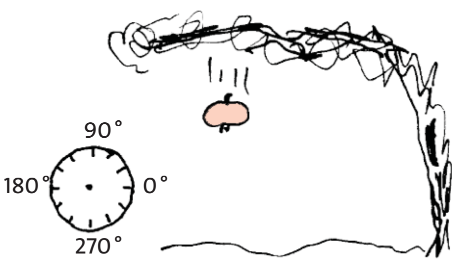


Abb. 6.11 Zu Aufgabe 3

6.3 Die Addition von Vektoren

Noch einmal der Teich mit dem Floß, Abb. 6.12. Das Floß hat Schwung nach rechts. Physikalisch gesprochen: Es hat 0°-Impuls — nehmen wir an, 500 Hy. Willy drückt mit der Stange gegen das Floß, in der Abbildung von unten her. Er drückt so, dass pro Sekunde 50 Huygens 90°-Impuls in das Floß gehen. Er drückt 3 Sekunden lang. Wie viel Impuls hat das Floß am Ende?

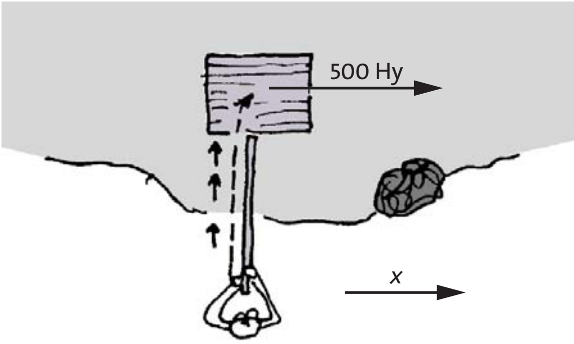


Abb. 6.12 Das Floß hat 500 Hy 0°-Impuls und bekommt 150 Hy 90°-Impuls dazu.

Es hat 500 Hy 0°-Impuls und $3 \cdot 50$ Hy 90°-Impuls. Aber wie viel ist das zusammen? Und was für Impuls ist es? Du kannst dir sicher vorstellen, dass sich das Floß am Ende weder parallel noch quer zur x-Richtung bewegt, sondern irgendwie schräg, nach rechts oben in der Abbildung. Der Gesamtimpuls am Ende ist also kein 0°-Impuls und auch kein 90°-Impuls.

Die Frage nach dem Gesamtimpuls kann man so formulieren: Wie addiert man Vektoren? Wie zählt man 500 Hy 0°-Impuls und 150 Hy 90°-Impuls zusammen?

Man findet das Ergebnis leicht, wenn man die Pfeildarstellung der Impulsvektoren benutzt.

Wir stellen jeden der beiden Impulse durch seinen Pfeil dar, Abb. 6.13a. Wir nennen die Impulsvektoren $\vec{p}_1$ und $\vec{p}_2$. Wir hängen sie nun so aneinander, dass der Anfangspunkt von $\vec{p}_2$ mit der Spitze von $\vec{p}_1$ zusammenfällt, Abb. 6.13b. Dann zeichnen wir einen dritten Pfeil $\vec{p}_3$, dessen Anfangspunkt mit dem Anfangspunkt von $\vec{p}_1$ und dessen Spitze mit der Spitze von $\vec{p}_2$ zusammenfällt. Der Pfeil $\vec{p}_3$ stellt den gesuchten Gesamtimpuls dar.

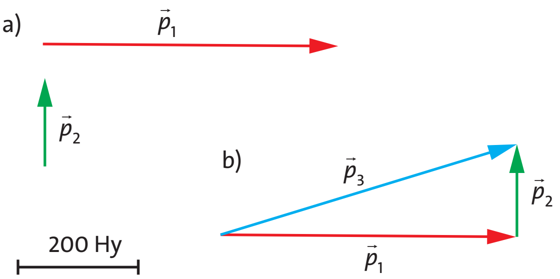


Abb. 6.13 Vektoraddition

Was wir gerade gemacht haben, nennt man Vektoraddition. Man beschreibt sie symbolisch durch

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3.$$

Statt $\vec{p}_2$ an $\vec{p}_1$ zu hängen, kann man auch $\vec{p}_1$ an $\vec{p}_2$ hängen, Abb. 6.14.

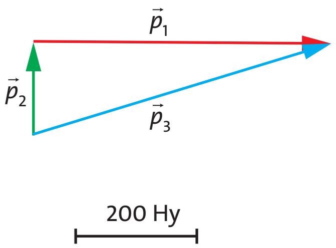


Abb. 6.14 Die Vektoraddition ist kommutativ.

Man erhält dasselbe Ergebnis. Die Vektoraddition ist also, wie die gewöhnliche Addition, kommutativ.

Beispiel

Ein 0,5 kg schwerer Stein wird in waagrechter Richtung geworfen, Abb. 6.15. Er hat sofort nach dem Abwerfen 3 Hy 0°-Impuls. Aufgrund seiner Schwere bekommt er nun von der Erde ständig neuen Impuls, und zwar 270°-Impuls. Wie viel und was für Impuls hat er nach 2 Sekunden?

Die Stärke des Impulsstroms von der Erde berechnen wir zu

$$F = m \cdot g = 0{,}5\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} = 5\ \text{N}$$

Der Stein bekommt also von der Erde ro Sekunde 5 Hy. Der Impuls, der in 2 Sekunden von der Erde gekommen ist, beträgt

$$p = F \cdot t = 5\ \text{Hy/s} \cdot 2\ \text{s} = 10\ \text{Hy}$$

Wir müssen nun addieren

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3.$$

wobei

$\vec{p}_1$: 3 Hy 0°-Impuls
$\vec{p}_2$: 10 Hy 270°-Impuls

ist. Abb. 6.16 zeigt die Lösung. Den Betrag des Gesamtimpulses können wir mit dem Satz des Pythagoras finden:

$$\text{Betrag von}\quad \vec{p}_3 = \sqrt{(3\ \text{Hy})^2 + (10\ \text{Hy})^2}$$
$$= \sqrt{9+100}\ \text{Hy}$$
$$= 10{,}44\ \text{Hy}$$

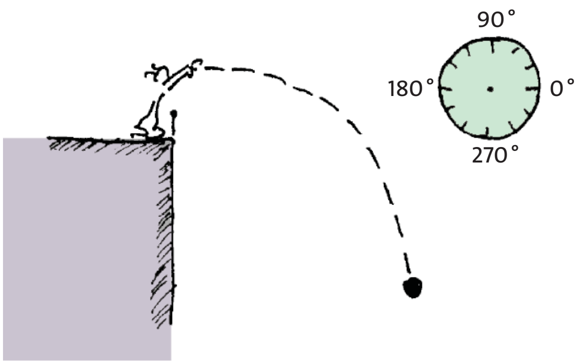


Abb. 6.15 Der Stein hat zu Anfang nur 0°- Impuls. Über das Schwerefeld bekommt er ständig 270°-Impuls hinzu.

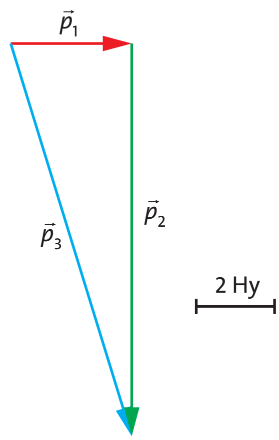


Abb. 6.16 Vektorpfeile des Wurfvorgangs von Abb. 6.15

Beispiel

Ein Boot wird von Lilly und Willy durch einen Kanal gezogen. Lilly läuft auf dem einen Ufer, Willy auf dem anderen, Abb. 6.17. Die Seile bilden einen Winkel von 30° gegen den Kanal. (Oder besser: das Seil oben in der Abbildung bildet einen Winkel von 30°, das untere einen von 330°.) In jedem Seil fließt ein Impulsstrom vom Betrag 90 N. Wie viel Impuls bekommt das Boot pro Sekunde? Was für Impuls bekommt es?

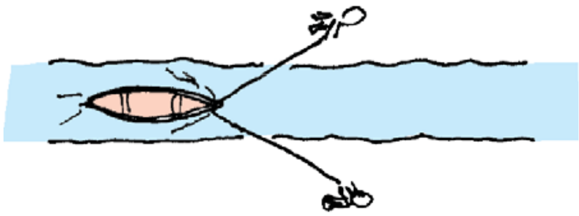


Abb. 6.17 Das Boot bekommt von Lilly 30°-Impuls und von Willy 330°-Impuls.

Im oberen Seil fließen 90 Newton 30°-Impuls zum Boot, im unteren 90 N 330°-Impuls. In Abb. 6.18 wurden die beiden Stromstärke-Vektorpfeile zusammengesetzt. Die Gesamtstromstärke in das Boot hinein ist die Vektorsumme.

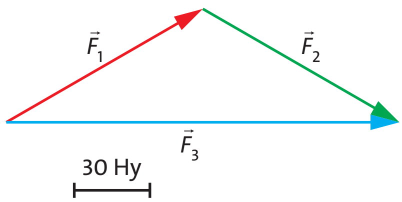


Abb. 6.18 Stromstärkevektorpfeile zu Abb. 6.17

Man entnimmt der Zeichnung: Gesamtstromstärke: 156 N 0°-Impuls.

Beispiel

Ein Auto fährt eine 90°-Kurve, Abb. 6.19a. Sein Impuls hat vorher und nachher denselben Betrag, nämlich 30 000 Hy. Während der Kurvenfahrt bekommt das Auto Impuls von der Erde. Dabei gilt: Anfangsimpuls des Autos + Impuls von der Erde = Endimpuls des Autos. Das Pluszeichen bedeutet hier Vektoraddition.

Abb. 6.19b zeigt, wie man den Vektorpfeil des Impulses konstruiert, der von der Erde kommt. Die Richtung des Impulses, der von der Erde

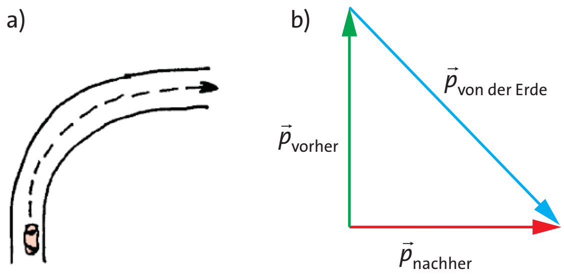


Abb. 6.19 (a) Ein Auto fährt eine 90°-Kurve. (b) Konstruktion des Vektorpfeiles des Impulses, den das Auto von der Erde bekommt

kommt, ist die Richtung der Winkelhalbierenden des Winkels, den die beiden geraden Straßenstücke bilden. Den Betrag des Impulses, der von der Erde ins Auto geht, erhält man mit dem Satz von Pythagoras zu etwa 42 000 Hy.

Aufgaben

1. Ein 100 g schwerer Stein wird von einem Turm aus waagrecht weggeworfen. Sein Anfangsimpuls ist 0,5 Hy.
   a) Wie viel und was für Impuls bekommt er innerhalb einer Sekunde von der Erde?
   b) Konstruiere den Vektorpfeil des Impulses, den der Stein eine Sekunde nach dem Abwurf hat.
   c) Welchen Betrag hat der Impuls eine Sekunde nach dem Abwurf?
2. Ein 0,3 kg schwerer Stein wird von einem Turm aus waagrecht abgeworfen. Seine Anfangsgeschwindigkeit beträgt 5 m/s. a) Welchen Betrag hat sein Anfangsimpuls? b) Zu einem bestimmten Zeitpunkt beträgt der Winkel, unter dem der Stein nach schräg unten fliegt, gerade 45°. Wie viel Impuls hat der Stein bis zu diesem Zeitpunkt von der Erde bekommen? Konstruiere das Vektorpfeildiagramm. Welchen Betrag hat der Impuls zu diesem Zeitpunkt?
3. Eine 3 kg schwere Kugel wird unter einem Winkel von 45° gegen die Waagrechte schräg nach oben gestoßen. Sie hat einen Anfangsimpuls von 12 Hy. Nach welcher Zeit bewegt sie sich unter 45° gegen die Waagrechte schräg nach unten?
4. Ein Zug fährt eine 30°-Kurve. Er fährt mit 70 km/h und hat eine Masse von 1 200 t. Konstruiere den Vektorpfeil des Impulses, den der Zug von der Erde bekommt.
5. Ein Auto fährt eine 90°-Biegung. Seine Geschwindigkeit vorher beträgt 30 km/h, nachher 50 km/h. Seine Masse ist 1400 kg. Konstruiere den Vektorpfeil des Impulses, den das Auto während der Kurvenfahrt bekommt. Wie groß ist der Betrag dieses Impulses?
6. Der Tormann wirft den Ball ins Spielfeld. Ein Spieler kickt ihn direkt wieder zurück ins Tor. Beschreibe in Worten, woher der Ball auf seinem Weg Impuls bekommt, oder an wen er welchen verliert. Berücksichtige dabei die Luftreibung.

6.4 Satelliten, Monde, Planeten

Wir haben gesehen: Ein Gegenstand in der Nähe der Erdoberfläche bekommt 270°-Impuls. Lässt man ihn aus dem Ruhezustand heraus los, so nimmt sein 270°-Impuls zu, und er setzt sich in Bewegung — in Richtung Erde.

Aber auch wenn man den Gegenstand nicht einfach loslässt, sondern ihn waagrecht wegwirft, fällt er zur Erde, Abb. 6.15.

Wir wollen uns vorstellen, dass wir einen Gegenstand von einem hohen Berg aus so wegwerfen, dass er sehr, sehr viel 0°-Impuls mitbekommt. Abb. 6.20 zeigt die Flugbahn für drei verschiedene Werte des anfänglichen 0°-Impulses.

Der Körper fliegt so weit, dass sich die Krümmung der Erdoberfläche bemerkbar macht. Dabei passiert nun etwas Bemerkenswertes: In der Nähe des Abschussortes bekommt der Körper 270°-Impuls. Im Laufe des Fluges ändert sich aber die Richtung des neu hinzukommenden Impulses. So bekommt der Körper der Abb. 6.20 am Ende der Flugbahn c nicht mehr 270°-Impuls, sondern 240°-Impuls.

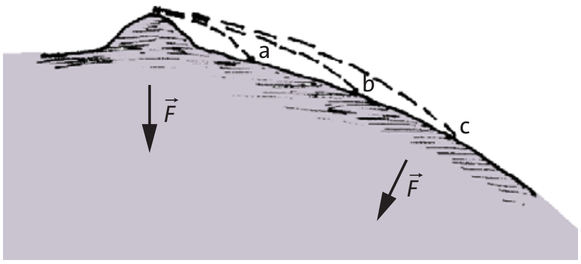


Abb. 6.20 Ist der Anfangsimpuls größer als der für eine Kreisbahn nötige, so bewegt sich der Satellit auf einer ellipsenförmigen Bahn.

Schafft man es nun, dem Anfangsimpuls einen geeigneten, sehr großen Wert zu geben, so entsteht die Situation von Abb. 6.21. Der Körper fällt und fällt, und nähert sich trotzdem nicht der Erde. An der Stelle A bekommt er 270°-Impuls, bei B bekommt er 225°-Impuls, bei C 180°-Impuls, bei D 90°-Impuls, bei E 0°-Impuls usw. Der hinzukommende Impuls bewirkt, dass die Bahn des Körpers an jeder Stelle zur Erde hin gekrümmt ist. Ist der Anfangsimpuls richtig gewählt, so beschreibt der Körper eine Kreisbahn.

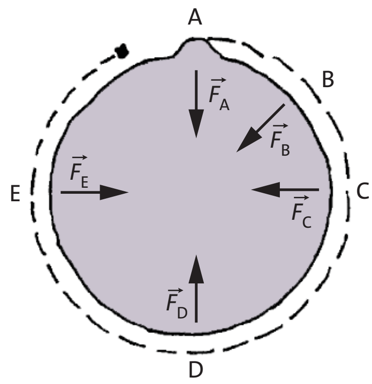


Abb. 6.21 Die Richtung des von der Erde hinzukommenden Impulses ist quer zur Richtung des Impulses, den der fliegende Körper gerade hat.

Die Richtung des Impulses, den der Körper in jedem Augenblick bekommt, ist quer zur Richtung des Impulses, den er in dem Augenblick gerade hat. So hat der Körper bei B 315°-Impuls, und er bekommt 225°-Impuls. Bei C hat er 270°-Impuls, und er bekommt 180°-Impuls usw.

Du hast hoffentlich bemerkt, dass wir hier nicht ein verrücktes, völlig unrealistisches Gedankenexperiment diskutiert haben. Wenn man sagt, ein Satellit werde in eine „Umlaufbahn" gebracht, so meint man,

- dass man ihn in eine bestimmte Höhe bringt,
- dass man ihm die richtige Menge an waagrechtem Impuls mitgibt, sodass er auf einer Kreisbahn umläuft.

Falls man dem Satelliten zu wenig Impuls mitgibt, kommt er zurück zur Erde — wie die Körper in Abb. 6.20. Gibt man ihm aber etwas mehr Impuls mit als für die Kreisbahn notwendig ist, so fliegt er zunächst weiter hinaus. Er bewegt sich auf einer elliptischen Bahn, Abb. 6.22.

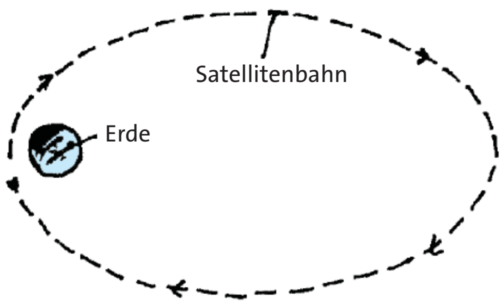


Abb. 6.22 Ist der Anfangsimpuls größer als der für eine Kreisbahn nötige, so bewegt sich der Satellit auf einer ellipsenförmigen Bahn.

Erst bei sehr viel größerem Anfangsimpuls erreicht man es, dass er ganz von der Erde wegfliegt. Er ist dann kein Satellit mehr, sondern eine Raumsonde. (Eine sehr erfolgreiche Raumsonde war Voyager-2. Sie hat nach etwa zehnjährigem Flug das Sonnensystem verlassen.)

Satellitenbewegungen sind aber keine Erfindung des Menschen. Es gab sie in der Natur längst bevor es Menschen gab. Die Bewegung des natürlichen Satelliten Mond auf einer Kreisbahn um die Erde ist von derselben Art wie die Bewegung der künstlichen Satelliten. Nur fliegt der Mond in einer viel größeren Entfernung. Während sich künstliche Satelliten in einer Höhe zwischen 200 km und 40 000 km über der Erdoberfläche bewegen, ist die Entfernung des Mondes von der Erde knapp 400 000 km.

Wahrscheinlich weißt du, dass nicht nur die Erde, sondern auch andere Planeten Monde haben.

Schließlich ist die Bewegung der Erde und der anderen Planeten um die Sonne eine Bewegung der Art, wie du sie gerade kennen gelernt hast. Die Erde bekommt (wie die anderen Planeten) ständig Impuls von der Sonne. Die Richtung des Impulses, den sie in jedem Augenblick bekommt, ist quer zu der Richtung des Impulses, den sie gerade hat.

6.5 Räder

Wir hatten uns mit Impulsleitern und -nichtleitern beschäftigt, als wir noch nicht wussten, dass Impuls ein Vektor ist. Damals gab es für uns nur Impuls einer einzigen Sorte, und wir haben nur Bewegungen einer einzigen Richtung betrachtet.

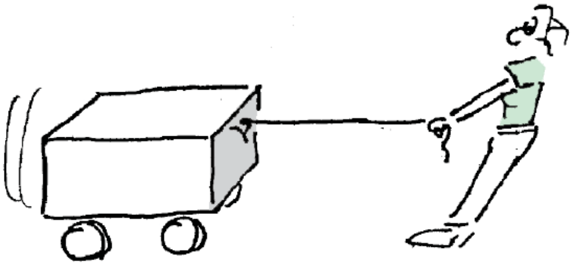


Abb. 6.23 Der Wagen ist durch die Räder von der Erde isoliert. Der Impuls, der von Lilly kommt, kann daher nicht abfließen, er häuft sich im Wagen an.

Wir hatten unter anderem die folgende Regel gefunden: Räder dienen der Impulsisolation.

Diese Regel wird komplizierter, wenn man Impuls verschiedener Richtungen fließen lässt.

Abb. 6.23 zeigt noch einmal, wie man sich davon überzeugen kann, dass Räder den Impulsfluss in die Erde verhindern. Lilly zieht, Impuls fließt durch das Seil in den Wagen. Da der Impuls nicht durch die Räder in die Erde abfließen kann, häuft er sich an, der Wagen wird schneller.

In Abb. 6.24 zieht Willy an dem Wagen. Trotz der Räder bleibt der Impuls aber nicht im Wagen. Er fließt ab, und der Wagen rührt sich nicht. Der Unterschied zu Abb. 6.23: Der Impuls, der in den Wagen geht, steht quer zu den Rädern. Also:

> Räder lassen Querimpuls in die Erde abfließen. Längsimpuls wird nicht durchgelassen.

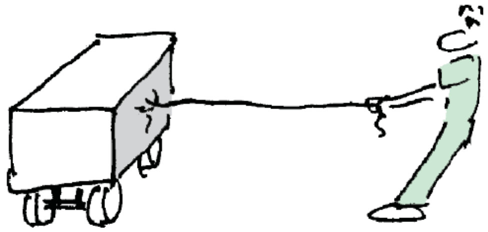


Abb. 6.24 Der Impuls, der von Willy kommt, fließt in die Erde ab. Querimpuls wird von den Rädern nicht zurückgehalten.

Wir haben hier etwas Schwarz-Weiß-Malerei betrieben. Denn zum einen fließt auch von dem Längsimpuls wegen der Reibung ein kleiner Teil in die Erde. Und zum anderen kann man durch kräftiges Ziehen (d. h. einen sehr starken Impulsstrom) die leitende Verbindung für den Querimpuls von Abb. 6.24 zum Zusammenbruch bringen, Abb. 6.25.

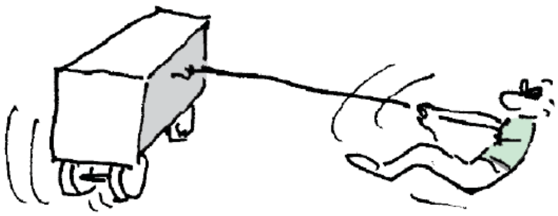


Abb. 6.25 Wird der Impulsstrom zu stark, so bricht die leitende Verbindung zusammen.

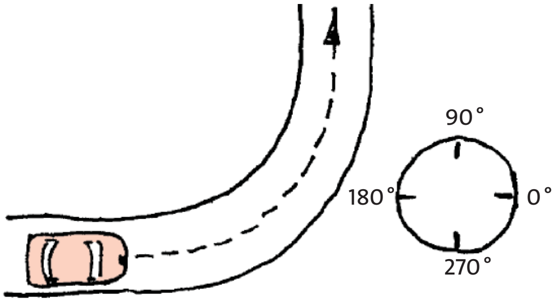


Abb. 6.26 Das Auto muss in der Kurve seinen 0°-Impuls an die Erde loswerden, und es muss von der Erde 90°-Impuls bekommen.

Das Auto von Abb. 6.26, das um die Kurve fährt, muss seinen 0°- Impuls loswerden. Dies funktioniert deshalb, weil die Räder den Querimpuls in die Erde abfließen lassen. Außer bei Glatteis. Dann sind die Räder für Impuls jeder Richtung Nichtleiter. Da sind Schienenfahrzeuge sicherer. Querimpuls wird bei ihnen von den Rädern immer sehr gut abgeleitet.

Viel verwaschener sind die Verhältnisse bei einem Schiff. Längsimpuls fließt schlechter ins Wasser ab als Querimpuls, aber der Unterschied ist nicht so groß wie bei Landfahrzeugen.

Manchmal ist es erwünscht, dass ein Fahrzeug weder Längs- noch Querimpuls an die Erde verliert. Eine Methode, dies zu erreichen: Man bringt die Räder so an, dass sie ihre Richtung ändern können. Wahrscheinlich haben bei euch die Tische, mit denen die Versuche in den Physiksaal gefahren werden, solche Räder, Abb. 6.27.

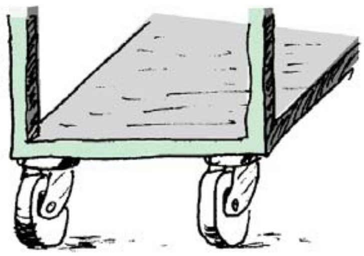


Abb. 6.27 Die Räder sind schwenkbar. Sie lassen weder Längs- noch Querimpuls durch.

Sind wir nun mit den Rädern fertig? Noch nicht ganz, wir haben ja nur Bewegungen in der Ebene betrachtet, in der der Wagen rollt. Es fehlt noch die dritte Richtung.

Nimm einen kleinen Wagen in die Hand, drücke ihn von oben auf die Tischplatte. Er setzt sich natürlich nicht in Bewegung. Ziehe an ihm senkrecht nach oben. Er bewegt sich nach oben. Mache das Entsprechende an der Wand statt auf dem Tisch. Drückt man das Fahrzeug gegen die Wand, so setzt es sich nicht in Bewegung, der Impuls fließt ab, Abb. 6.28. Zieht man es von der Wand weg, so setzt es sich in Bewegung, der Impuls fließt nicht ab. Die Räder waren hier übrigens völlig überflüssig.

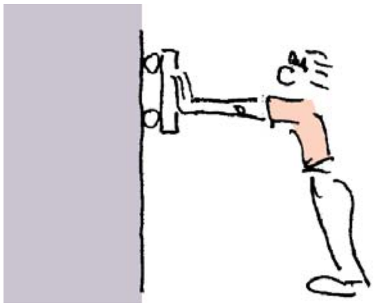


Abb. 6.28 Impuls, dessen Richtung quer zur Standfläche des Wagens liegt, wird in die Wand abgeleitet.

Beispiel

Ein 20 kg schwerer Wagen steht auf einer abschüssigen Straße, die Bremsen werden gelöst, Abb. 6.29. Was macht der Wagen? Über das Schwerefeld fließt ständig 270°-Impuls in den Wagen. Der Betrag der Impulsstromstärke ist

$$F = m \cdot g = 20\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} = 200\ \text{N}.$$

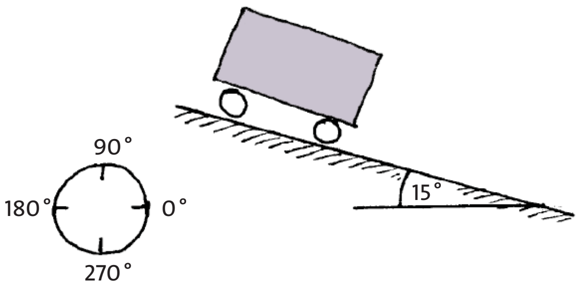


Abb. 6.29 In den Wagen kommt 270°-Impuls hinein. Er wird zerlegt in einen Anteil, der in die Erde abfließt, und einen Anteil, der sich im Wagen anhäuft.

Was passiert mit diesem Impuls? Fließt er ab in die Erde? Häuft er sich an?

Wir wissen zwar nicht, was mit 270°-Impuls passiert, aber wir wissen, was mit dem Impuls passiert, der parallel zur Standfläche des Wagens liegt und mit dem, der quer zur Standfläche des Wagens liegt.

Impuls in Längsrichtung des Wagens ist 345°-Impuls. Er kann nicht abfließen, muss sich also im Wagen anhäufen.

Impuls quer zur Standfläche ist 255°-Impuls. Er fließt vollständig in die Erde ab.

Alles, was wir tun müssen, ist: den ankommenden 270°-Impulsstrom $\vec{F}$ in einen 345°-Strom $\vec{F}_{\text{längs}}$ und einen 255°-Strom $\vec{F}_{\text{quer}}$ zerlegen, Abb. 6.30. Man entnimmt der Abbildung

$\vec{F}_{\text{längs}} = 50$ N,
$\vec{F}_{\text{quer}} = 190$ N.

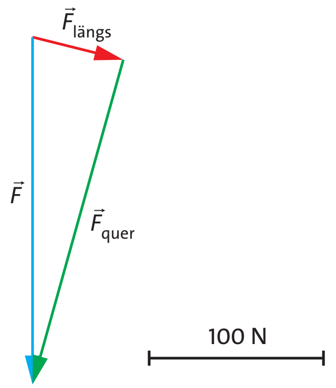


Abb. 6.30 Zerlegung des Stromstärkevektors des ankommenden 270°-Impulses in einen 255°-Anteil und einen 345°-Anteil.

Also: Pro Sekunde fließen 190 Hy in die Erde ab, und der Impuls des Wagens nimmt um 50 Hy zu.

Aufgaben

1. Ein zylinderförmiger Griff Z kann ohne Reibung auf einer Stange S hin- und hergleiten, Abb. 6.31a. Für welchen Impuls ist die Verbindung zwischen Griff und Stange durchlässig, für welchen ist sie undurchlässig?
2. Der Zylinder Z_1 kann auf der Stange S und die Zylinder Z_2 und Z_3 können auf dem Rahmen R hin- und hergleiten, Abb. 6.31b. Für welchen Impuls ist die Verbindung zwischen Z_1 und dem Rahmen durchlässig, für welchen nicht?

a)

b)

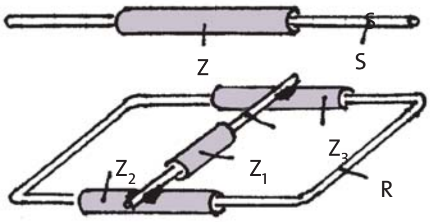


Abb. 6.31 (a) Zu Aufgabe 1; (b) Zu Aufgabe 2

6.6 Seile

Noch eine alte Regel, die wir ergänzen müssen: Seile leiten den Impuls nur in eine Richtung.

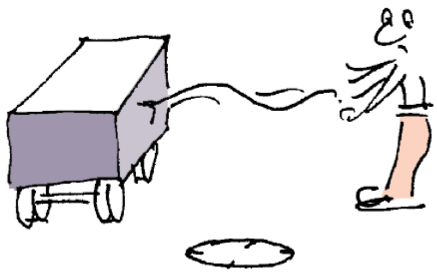


Abb. 6.32 Lilly versucht mit einem Seil, einen Wagen quer zur Seilrichtung in Bewegung zu setzen.

Was in Abb. 6.32 vor sich geht, ist nicht leicht zu erkennen: Lilly versucht, den Wagen mithilfe des Seils in Bewegung zu setzen — natürlich ohne Erfolg. Mit dem Impuls ausgedrückt: Sie versucht, durch ein Seil, das in 0°-Richtung liegt, 90°-Impuls zu schicken. Und das geht nicht. Seile sind also wählerisch:

> Man kann durch ein Seil nur Impuls schicken, der parallel zum Seil liegt, und diesen nur in eine Richtung.

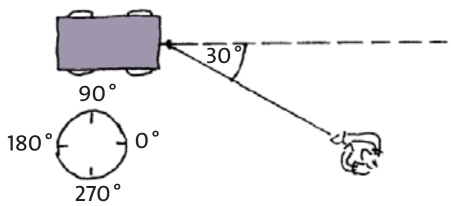


Abb. 6.33 Wagen mit Seil, von oben gesehen. Am Seil wird gezogen. Der 0°-Impuls des Wagens nimmt zu.

Wir wollen diese neu formulierte Regel anwenden. Abb. 6.33 zeigt, von oben gesehen, einen Wagen, an dem mithilfe eines Seils gezogen wird. Es wird aber nicht nach vorn gezogen, sondern etwas nach der Seite. Im Seil fließe ein Impulsstrom von 40 N. Um wie viel Hy ändert sich der Impuls des Wagens pro Sekunde? Wie viel Impuls fließt in die Erde ab?

Der im Seil fließende Impuls muss dieselbe Richtung wie das Seil haben. Den entsprechen-

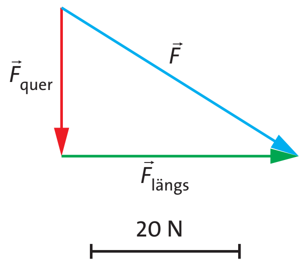


Abb. 6.34 Der Impulsstromstärke-Vektor des Seils wird in Längs- und Queranteil zerlegt.

den Stromstärkevektor nennen wir $\vec{F}$, Abb. 6.34. Wir zerlegen diesen Strom in zwei Anteile:

- einen Anteil $\vec{F}_{quer}$, der quer zur Wagenrichtung liegt, und der über die Räder abfließt;
- einen Anteil $\vec{F}_{längs}$, der in Wagenrichtung liegt, und der die Impulszunahme des Wagens bewirkt.

Man entnimmt der Abbildung:

$$\vec{F}_{quer} = 20 \text{ N}.$$
$$\vec{F}_{längs} = 34 \text{ N},$$

Also: Pro Sekunde fließen 20 Hy Querimpuls in die Erde ab, und der Längsimpuls des Wagens nimmt um 34 Hy zu.

Aufgaben

1. Ein Spielzeugauto wird mit einem Seil über den waagrechten Fußboden gezogen. Das Seil läuft schräg nach oben, Abb. 6.35. Im Seil fließt ein Impulsstrom von 20 N. Wie viel N tragen zur Vorwärtsbewegung des Autos bei?
2. Ein Auto schleppt ein anderes ab. Die Autos fahren in derselben Richtung, sind aber um 1 m seitlich gegeneinander versetzt, Abb. 6.36. Das Abschleppseil ist 3 m lang. Durch das Seil fließt ein Impulsstrom von 500 N. Welcher Impulsstrom trägt zur Bewegung des abgeschleppten Autos bei?

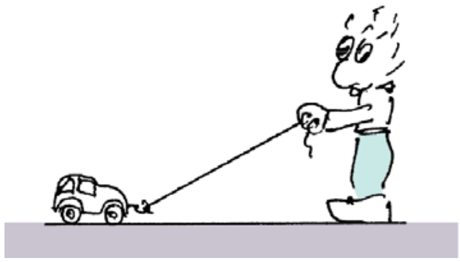


Abb. 6.35 Zu Aufgabe 1

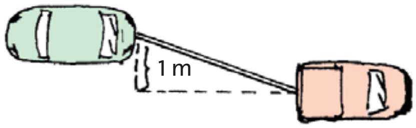


Abb. 6.36 Zu Aufgabe 2

6.7 Die Knotenregel für Impulsströme

Eine Lampe ist mithilfe von Seilen an zwei gegenüberliegenden Hauswänden befestigt, Abb. 6.37. Sie hat eine Masse von 3,5 kg. Wie werden die Haken an den Wänden belastet?

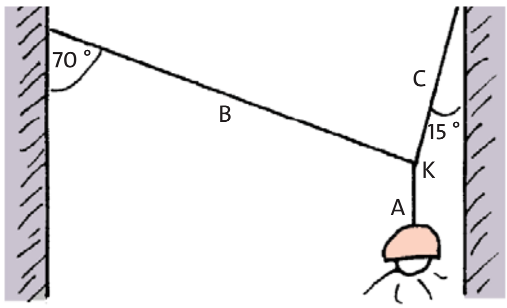


Abb. 6.37 Wie stark werden die beiden Hauswände durch die Lampe belastet?

Gefragt ist, wie du hoffentlich erkennst, nach den Impulsstromvektoren in den Seilen B und C. Zunächst können wir uns leicht den Impulsstrom in Seil A beschaffen. In die Lampe fließt über das Schwerefeld 270°-Impuls hinein. Die entsprechende Stromstärke hat den Betrag

$$F = m \cdot g = 3.5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 35 \text{ N}$$

Dieser Impulsstrom fließt durch Seil A zum Knoten K. Wie geht es aber von K aus weiter?

Weil B ein Seil ist, kann hier nur solcher Impuls fließen, der parallel zu B liegt. Das Entsprechende gilt für C. Wir müssen daher den Vektor $\vec{F}_A$ in zwei Vektoren zerlegen: einen Vektor $\vec{F}_B$, der parallel zu B liegt, und einen Vektor $\vec{F}_C$, der parallel zu C liegt. Die Gesamtstromstärke in B und C muss gleich der in A sein, d. h., es muss gelten

$$\vec{F}_A = \vec{F}_B + \vec{F}_C.$$

In Abb. 6.38 wurde die Zerlegung durchgeführt. $\vec{F}_A$ liegt parallel zu Seil A, $\vec{F}_B$ parallel zu Seil B und $\vec{F}_C$ parallel zu Seil C. Durch Abmessen der Längen der Vektorpfeile $\vec{F}_B$ und $\vec{F}_C$ findet man

$$\vec{F}_B = 9\text{ N und } \vec{F}_C = 33\text{ N}.$$

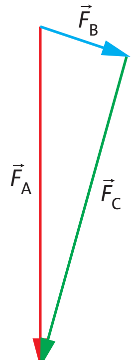


Abb. 6.38 Der in Seil A zum Knoten K hin fließende Impulsstrom ist genauso groß wie die beiden in den Seilen B und C wegfließenden Ströme zusammen.

Hast du bemerkt, dass wir es hier mit einem alten Bekannten zu tun haben? Wir haben nämlich eine Knotenregel angewendet, die Knotenregel für Impulsströme:

> Die zu einem Knoten hinfließenden Impulsströme sind zusammen genauso stark wie die wegfließenden.

Ein Knoten ist eine Stelle, an der sich drei oder mehr Impulsströme treffen. Mit „zusammen" ist gemeint, dass die Stromstärken nach den Regeln der Vektoraddition zusammengesetzt werden.

Aufgaben

1. Zwei Schleppkähne ziehen ein Schiff, Abb. 6.39. Jeder Kahn zieht mit 15 000 N. Wie stark ist der Impulsstrom in dem Seilstück, das am Schiff befestigt ist?
2. An den Haken in Abb. 6.40 soll ein 10 kg schwerer Gegenstand gehängt werden. Das Seil hält Impulsströme bis zu 200 N aus, bei stärkeren Strömen reißt es. Was passiert? Hält es oder hält es nicht?

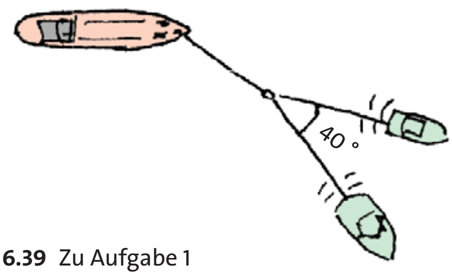


Abb. 6.39 Zu Aufgabe 1

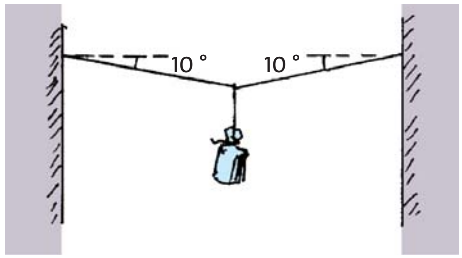


Abb. 6.40 Zu Aufgabe 2

7 DREHMOMENT UND SCHWERPUNKT

7.1 Rollen und Flaschenzüge

Räder, über die Seile, Ketten oder Treibriemen laufen, sind in der Technik sehr wichtig. Räder mit Seilen begegnen uns als Umlenkrollen bei einem Kran oder beim sogenannten Flaschenzug. Kettenräder kennst du vom Fahrrad und vom Motorrad. Räder, über die ein „Keilriemen" läuft, befinden sich, oft versteckt, in vielen Maschinen, z. B. in einer großen Bohrmaschine. Flache Treibriemen wurden früher sehr viel zum Antrieb der Maschinen einer Fabrik benutzt.

Wir befassen uns im Folgenden mit dem Impuls- und dem Energiefluss durch solche Räder. Wir betrachten als Erstes sogenannte Rollen. Eine Rolle ist auf eine Achse gelagert, sodass sie sich frei drehen kann.

Abb. 7.1 zeigt eine Rolle, über die ein Seil läuft. In die drei Seilstücke A, B und C ist je ein Kraftmesser eingebaut. Er misst die Stärke des Impulsstroms durch das jeweilige Seil. An der Öse am rechten Ende von Seil A wird so gezogen, dass der entsprechende Kraftmesser 12 N anzeigt. Was zeigen die Messgeräte in den Seilstücken B und C an?

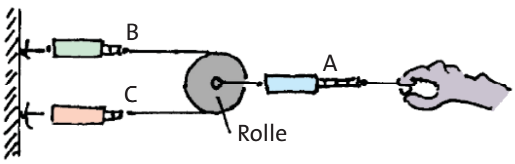


Abb. 7.1 Das Messgerät A zeigt doppelt so viel an wie B und wie C.

Wir können das Ergebnis voraussagen. Wir wissen zum einen, dass der Impulsstrom, der durch Seil A geht, in den Seilen B und C weiterfließt. Es muss daher

$$F_A = F_B + F_C.$$

sein. Weil die ganze Anordnung symmetrisch ist, muss außerdem noch gelten:

$$F_B = F_C.$$

Mit diesen beiden Gleichungen wird

$$F_B = F_A/2$$

und

$$F_C = F_A/2.$$

Wenn $F_A = 12$ N ist, wird also $F_B = 6$ N und $F_C = 6$ N.

Die gestrichelten Linien in Abb. 7.2 zeigen den Weg des Impulses. Die Pfeile neben den Linien geben an, welche Richtung der Impuls hat, der durch das Seil fließt. Diese Pfeile liegen parallel zu den Seilen.

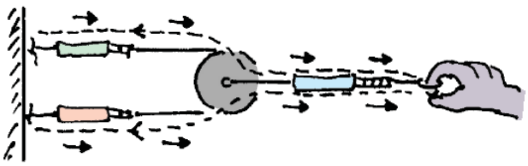


Abb. 7.2 Der von rechts kommende Impulsstrom verzweigt sich in der Rolle in zwei gleich große Anteile.

Man kann stärker oder weniger stark an der Öse ziehen. Die Anzeige des Kraftmessers in Seil A wird dann größer oder kleiner. Aber stets ändern sich auch die Werte der Impulsströme in den Seilen B und C, und zwar so, dass

$$F_B = F_C = F_A/2$$

Es ändert sich hieran natürlich nichts, wenn man an Seilstück B oder C zieht, statt an Seil A, Abb. 7.3.

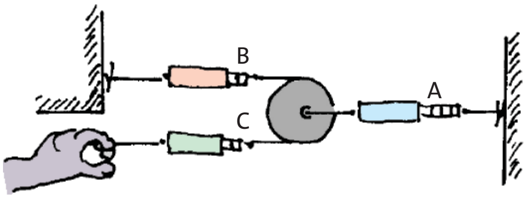


Abb. 7.3 Es ist egal, ob man bei A, B oder C zieht.

Wir gehen über zu einem komplizierteren Fall, Abb. 7.4.

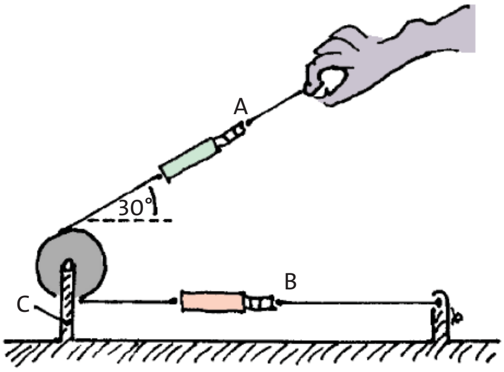


Abb. 7.4 Auch hier zeigen die Messgeräte A und B denselben Wert an. Trotzdem sind die Stromstärken nicht gleich.

Wir ziehen an Seil A und stellen auch hier fest: Egal wie stark wir ziehen – das Messgerät in A zeigt stets dasselbe an wie das in B. Trotzdem sind die Impulsstromstärken in A und in B nicht gleich. Sie sind zwar vom selben Betrag, unterscheiden sich aber in der Richtung: Der Impuls, der in einem Seil fließt, hat ja immer dieselbe Richtung wie das Seil. In Seilstück A fließt daher 30°-Impuls zur Rolle hin, während in Seilstück B 0°-Impuls zur Rolle hin fließt.

Durch die Halterung der Rolle fließt die Summe der beiden Impulssorten in die Erde ab. Mit „Summe" ist natürlich die Vektorsumme gemeint, Abb. 7.5.

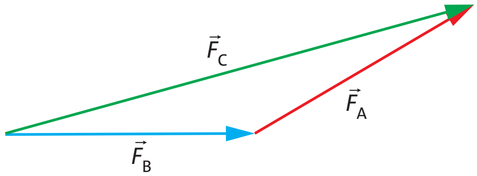


Abb. 7.5 Vektoraddition der Impulsstromstärken in den Seilen von Abb. 7.4.

Da die Beträge der Vektoren $\vec{F}_A$ und $\vec{F}_B$ gleich sind, hat $\vec{F}_C$ die Richtung der Winkelhalbierenden des Winkels zwischen den beiden Seilen.

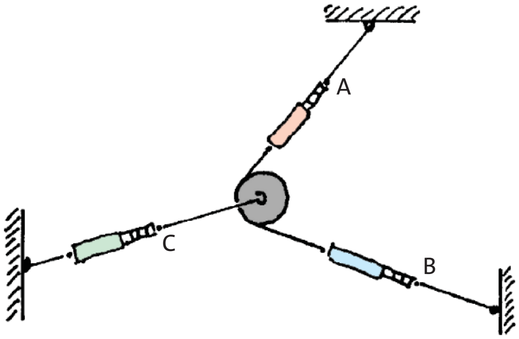


Abb. 7.6 Seil C stellt sich von selbst in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen den Seilen A und B ein.

Eine Variante der Situation von Abb. 7.4 zeigt Abb. 7.6. Da das Lager der Rolle mit der Wand über ein Seil verbunden ist (und nicht mit einer starren Verbindung), muss Leitung C dieselbe Richtung haben wie der dort fließende Impuls. Das merkt man, wenn man an A zieht. Die drei Federkraftmesser zeigen, dass Seil C stellt sich von selbst so ein, dass es in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen A und B liegt.

Die drei Federkraftmesser zeigen, dass

$$\vec{F}_C = \vec{F}_A + \vec{F}_B$$

sowie

$$\vec{F}_A = \vec{F}_B$$

gilt. Wir fassen zusammen:

> Wenn ein Seil über ein frei drehbares Rad (eine Rolle) läuft, sind die Impulsströme in den beiden Teilen des Seils vom gleichen Betrag.

In dem Satz wird betont, dass das Rad frei drehbar sein muss. Siehst du, warum? Stell dir vor, die Rolle in Abb. 7.4 sei blockiert, und das Seil könne auch nicht über die Rolle hinwegrutschen. Dann kann man natürlich an Seil A ziehen, ohne dass Seil B etwas davon merkt: Die Stromstärken $\vec{F}_A$ und $\vec{F}_B$ haben nicht mehr denselben Betrag.

Was kann man nun mit solchen Rollen anfangen?

Mit einem Motor soll eine Last hochgezogen werden, Abb. 7.7. Man führt das Seil, an dem die Last hängt, über zwei Umlenkrollen zum Motor. Der Betrag der Impulsstromstärke ist in allen drei Seilabschnitten derselbe, die Richtung aber nicht.

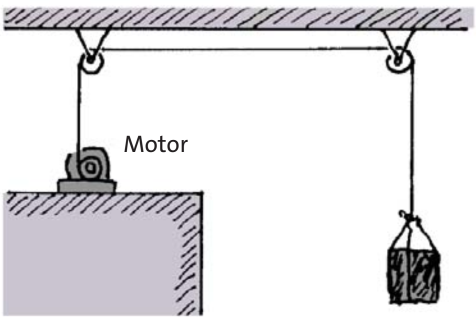


Abb. 7.7 Der Motor steht unten. Damit er die Last nach oben heben kann, wird das Seil mit zwei Rollen umgelenkt.

Diese Anwendung von Rollen ist so einfach, dass wir gewiss keine komplizierten physikalischen Überlegungen anzustellen brauchen, um sie zu verstehen. Es gibt aber schwierigere Anwendungen.

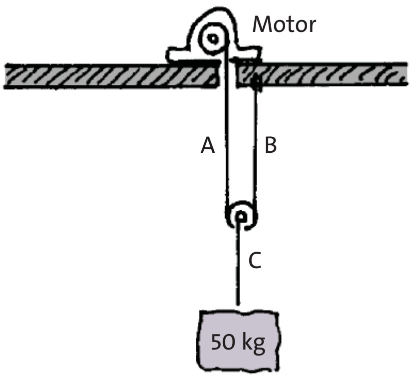


Abb. 7.8 Der Impulsstrom im Zugseil ist nur halb so groß wie der im Lastseil.

Wieder wird eine Last mithilfe eines Motors hochgezogen, Abb. 7.8. Das Seil läuft aber anders als vorher.

In Seil C fließt ein Impulsstrom von

$$F_C = m \cdot g = 50\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} = 500\ \text{N}.$$

In Seil A und in Seil B fließen also nur je 250 N — und das ist interessant: Um die Last zu heben, braucht der Motor nur halb so stark zu ziehen, wie er es müsste, wenn die Rolle nicht da wäre.

Diesen Trick zur Verminderung der Impulsstromstärke in einem Seil nützt man noch wirksamer beim sogenannten Flaschenzug aus. Eine etwas unübliche, dafür aber leicht zu durchschauende Version eines Flaschenzuges zeigt Abb. 7.9.

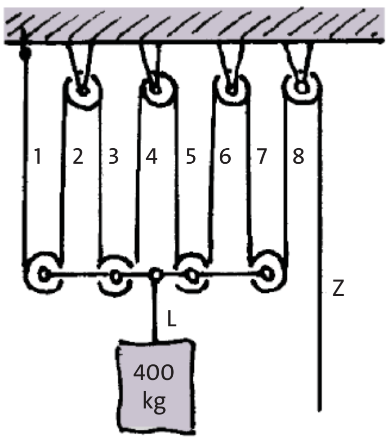


Abb. 7.9 Unpraktischer, aber übersichtlicher Flaschenzug

Die Lager der vier oberen Rollen sind an der Decke befestigt, die der unteren an einer Stange. An dieser Stange hängt die zu hebende Last. Die ersten acht Seilstücke sind von 1 bis 8 durchnummeriert, das Zugseil ist mit Z bezeichnet, und an L hängt die Last.

Um die Last zu heben, zieht man an dem Zugseilstück Z. Wie stark ist der Impulsstrom in Z? Wir arbeiten uns Schritt für Schritt zur Lösung vor. Da die Seilstücke 1 und 2 zu einem einzigen Seil gehören, das über eine Rolle läuft (die Rolle links unten), müssen die Stromstärken in diesen Seilstücken gleich sein:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2.$$

Du siehst, wie es weitergeht. Es gilt nämlich:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 = \vec{F}_3 = \vec{F}_4 = \vec{F}_5 = \vec{F}_6 = \vec{F}_7 = \vec{F}_8 = \vec{F}_Z\,.$$

Der nächste Schritt: Wir können die ganze Stange, auf der die unteren Rollen laufen, als einen Knoten auffassen. Der Impulsstrom $\vec{F}_L$, der von der Last kommt, fließt in die Stange hinein, die Ströme $\vec{F}_1$ bis $\vec{F}_8$ fließen heraus. Mit der Knotenregel gilt daher:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_5 + \vec{F}_6 + \vec{F}_7 + \vec{F}_8.$$

Da die Stromstärken $\vec{F}_1$ bis $\vec{F}_8$ untereinander gleich sind, gilt

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 = \vec{F}_3 = \vec{F}_4 = \vec{F}_5 = \vec{F}_6 = \vec{F}_7 = \vec{F}_8 = \vec{F}_L/8.$$

Aber auch $\vec{F}_Z$ hat denselben Wert wie $\vec{F}_1$ bis $\vec{F}_8$, es ist daher:

$$\vec{F}_Z = \vec{F}_L/8.$$

Um die Last zu heben, braucht man nur 1/8 desjenigen Impulsstroms, der durch die Last fließt. Das Ziehen geht also mit Flaschenzug viel leichter als ohne.

Ein echter Flaschenzug unterscheidet sich nur wenig von dem, den wir gerade untersucht haben, Abb. 7.10. Die oberen Rollen befinden sich alle auf einer gemeinsamen Achse; jede Rolle ist für sich frei drehbar. Das Entsprechende gilt für die unteren Rollen.

Zu sehen sind solche Flaschenzüge bei Kränen, die sehr schwere Lasten heben können, z. B. in Häfen.

Ein Flaschenzug ist eine sehr nützliche Sache. Wir haben etwas gewonnen: Mit einem kleinen Impulsstrom erzeugt man einen großen.

In einer anderen Beziehung haben wir aber nichts gewonnen, nämlich, was die Energie betrifft.

Wir stellen im nächsten Abschnitt die Energiebilanz des Flaschenzugs auf.

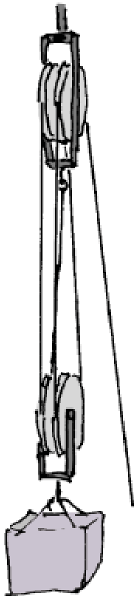
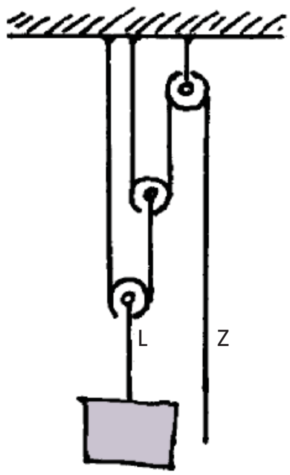


Abb. 7.10 Flaschenzug

Aufgaben

1. Zeichne einen Flaschenzug, bei dem der Impulsstrom durch den Haken, an dem die Last hängt, viermal so stark ist wie im Zugseil.
2. Wie stark ist der Impulsstrom im Zugseil des Flaschenzuges von Abb. 7.11?
3. Welchen Nachteil hat der „Flaschenzug“ von Abb. 7.12?

Abb. 7.11 Zu Aufgabe 2



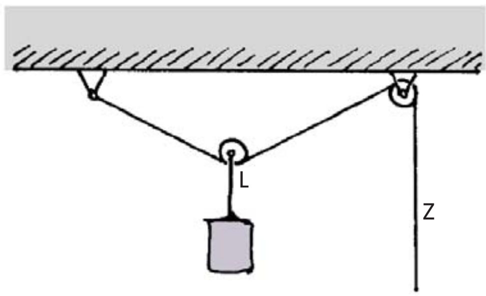


Abb. 7.12 Zu Aufgabe 3

7 DREHMOMENT UND SCHWERPUNKT

7.2 Die Energiebilanz beim Flaschenzug

Man zieht am Zugseil Z (Abb. 7.9), und zwar so, dass sich sein Ende um die Strecke s_Z bewegt. Die Energiemenge, die man dabei durch das Seil schickt, ist nach unserer alten Formel:

$$E_Z = s_Z \cdot F_Z \qquad (7.1)$$

An dem Seil, an dem die Last hängt, kommt Energie aus dem Flaschenzug heraus, und zwar der Betrag

$$E_L = s_L \cdot F_L \qquad (7.2)$$

Wir wollen E_Z und E_L vergleichen. Dazu benutzen wir den Zusammenhang

$$F_Z = F_L/8. \qquad (7.3)$$

Außerdem müssen wir uns den Zusammenhang zwischen s_L und s_Z beschaffen. Wir fragen also: Um welche Strecke s_L wandert die Last nach oben, wenn man so am Zugseil zieht, dass sich sein Ende um s_Z nach unten bewegt?

Beim Ziehen an Z verkürzen sich alle Seilstücke 1 bis 8 um denselben Betrag. Jedes einzelne Seilstück verkürzt sich daher um $s_Z/8$. Die Verkürzung jedes der Seile 1 bis 8 ist aber gerade gleich der Strecke s_L, um die die Last gehoben wird. Es ist also

$$s_Z = 8\,s_L. \qquad (7.4)$$

Wir setzen nun (7.3) und (7.4) in (7.1) ein und erhalten:

$$E_Z = 8\,s_L \cdot F_L/8 = s_L \cdot F_L.$$

Die Energiemenge E_Z, die man am Zugseil Z in den Flaschenzug hineinsteckt, ist gleich $s_L \cdot F_L$, d. h. nach Gleichung (7.2) gleich der Energiemenge E_L.

Die Energie, die wir bei Z hineinstecken, kommt also bei L wieder heraus – ein Ergebnis, das dich hoffentlich nicht überrascht. Anders ausgedrückt: Wir bezahlen den kleineren Impulsstrom mit einem längeren Weg. Wollen wir die Last um 1 m heben, so müssen wir 8 m Seil aus dem Flaschenzug herausziehen.

Aufgaben

1. Mit dem Flaschenzug von Abb. 7.11 wird eine Last von 100 kg um 1 m gehoben. Um wie viel Meter muss man am Zugseil ziehen? Wie viel Energie wird gebraucht?
2. Das Zugseil Z in Abb. 7.13 wird um 1 m nach oben bewegt. Wie viel Energie fließt dabei durch den Flaschenzug?
3. Abb. 7.14 zeigt, wie man eine Last mithilfe von zwei Motoren heben kann. Die Last hat eine Masse von 200 kg. Der linke Motor zieht so, dass sich das Zugseil Z_{links} mit 0,2 m/s bewegt. Der rechte zieht so, dass sich das rechte Seilstück Z_{rechts} mit 0,4 m/s bewegt. Wie stark ist der Impulsstrom in Z_{links} und in Z_{rechts}? Wie stark ist der Energiestrom in den beiden Seilstücken?

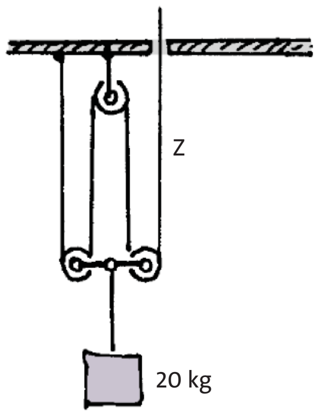


Abb. 7.13 Zu Aufgabe 2

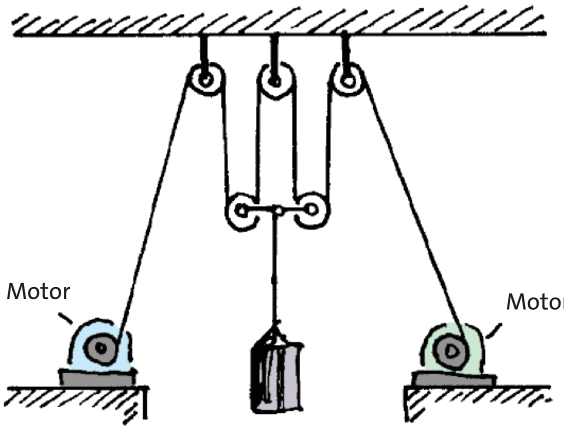


Abb. 7.14 Zu Aufgabe 3

7.3 Das Hebelgesetz

Mit Rollen kennen wir uns gut aus. Wir wissen, dass sich der durch A kommende Impulsstrom in der Rolle von Abb. 7.15 in zwei gleich große Teile aufzweigt. Da sich bei dieser Anordnung nichts bewegt, können wir die Rolle durch einen Stab ersetzen, ohne dass sich an den Impulsströmen etwas ändert, Abb. 7.16.

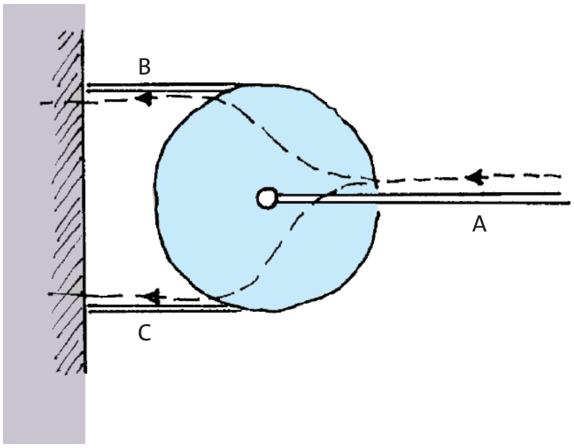


Abb. 7.15 Der über A ankommende Impulsstrom verzweigt sich in der Rolle in zwei gleich große Teilströme.

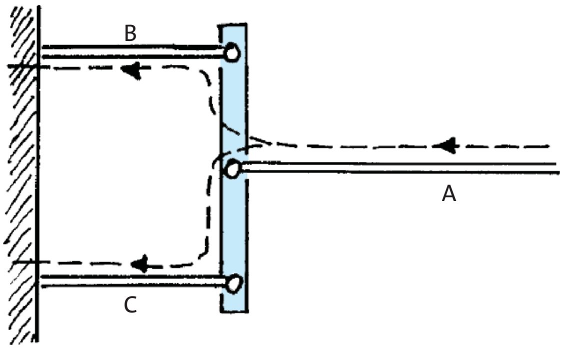


Abb. 7.16 Die Rolle kann durch einen Stab ersetzt werden, ohne dass sich die Impulsströme ändern.

Auch hier gilt noch

$$F_B = F_A/2 \text{ und } F_C = F_A/2.$$

Falls es dir nicht einleuchtet, prüfe es experimentell nach.

Wir ändern die Anordnung weiter ab: Wir befestigen Seil A nicht mehr in der Mitte des Stabes, sondern unsymmetrisch – so wie es Abb. 7.17 zeigt. Wir nennen r_B und r_C die Längen der Hebelarme. Nach wie vor muss sich der Strom, der über Seil A ankommt, auf B und C verteilen. Allerdings teilt er sich nun nicht mehr in zwei gleiche Teile auf.

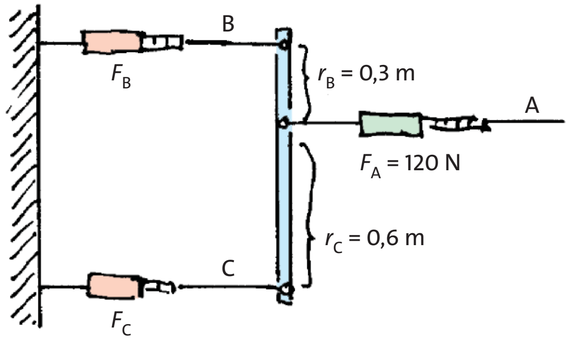


Abb. 7.17 Der Impulsstrom, der über Seil A ankommt, verzweigt sich in verschieden große Anteile.

Durch Nachmessen findet man

$$r_B \cdot F_B = r_C \cdot F_C.$$

Die Gleichung lässt sich umformen in

$$\frac{F_B}{F_C} = \frac{r_C}{r_B}.$$

In Worten:

> Die Impulsstromstärken verhalten sich umgekehrt zueinander wie die Hebelarme.

Dies ist das Hebelgesetz.

Im Fall von Abb. 7.17 ist

$$r_B = 0{,}3 \text{ m und } r_C = 0{,}6 \text{ m}.$$

Es wird also

$$\frac{F_B}{F_C} = \frac{0{,}6 \text{ m}}{0{,}3 \text{ m}} = 2{,}0$$

d. h. $F_B = 2 \cdot F_C$.

Da außerdem

$$F_B + F_C = 120 \text{ N}$$

ist, muss

$$F_B = 80 \text{ N und } F_C = 40 \text{ N}$$

sein.

Das Hebelgesetz lässt sich in eine bequemere Form bringen. Dazu beschreiben wir die Anordnung von Abb. 7.17 noch einmal — in etwas anderen Worten und mit anderen Buchstabensymbolen, Abb. 7.18.

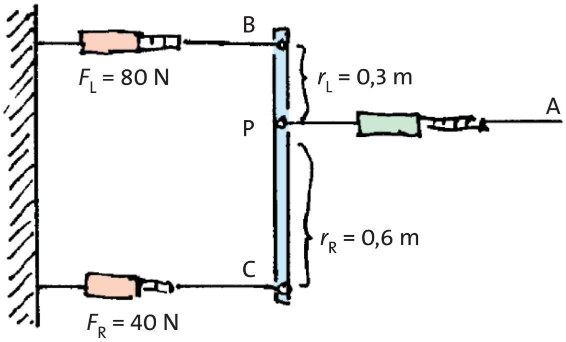


Abb. 7.18 Wie Abb. 7.17; nur die Bezeichnungen haben sich geändert.

Wir haben einen starren Stab, der sich nicht bewegt. In drei Punkten münden Impulsströme in den Stab ein. Den einen dieser Punkte nennen wir den Drehpunkt. Wir bezeichnen ihn mit P. Die Abstände der beiden anderen Punkte von P sind die Hebelarme. Wir bezeichnen sie mit r_R und r_L. Die Stärken der Impulsströme, die über die äußeren Einmündungspunkte zufließen, bezeichnen wir mit F_R und F_L. Bisher also nicht viel Neues.

Nun eine wichtige Neubenennung: Die Produkte $r_R \cdot F_R$ und $r_L \cdot F_L$ nennt man Drehmomente, und zwar ist $r_R \cdot F_R$ das Rechtsdrehmoment und $r_L \cdot F_L$ das Linksdrehmoment.

Warum die Namen Drehpunkt und Drehmoment? Was hat unser Problem mit Drehungen zu tun? Der Stab ist im Punkt P drehbar gelagert. Stellen wir uns vor, das untere Seil wäre nicht vorhanden. Dann würde das obere den Stab in Drehung versetzen, und zwar in eine Linksdrehung. Daher der Name Linksdrehmoment. Stellen wir uns dagegen vor, das obere Seil wäre nicht da. Dann würde das untere Seil den Stab um den Drehpunkt P in eine Rechtsdrehung versetzen.

Mit den neuen Buchstabensymbolen lautet das Hebelgesetz:

$$r_R \cdot F_R = r_L \cdot F_L$$

und in Worten:

> Das Rechtsdrehmoment ist gleich dem Linksdrehmoment.

Wenn man das Hebelgesetz so formuliert, sieht man, dass man es auf den Stab von Abb. 7.17 in noch anderer Weise anwenden kann, als wir es bisher getan haben. Dazu musst du allerdings wissen, dass es dir völlig freisteht, wohin du den Drehpunkt P legst.

Abb. 7.19 zeigt denselben Stab wie Abb. 7.17. Nur wurde hier der Drehpunkt in den unteren Einmündungspunkt gelegt.

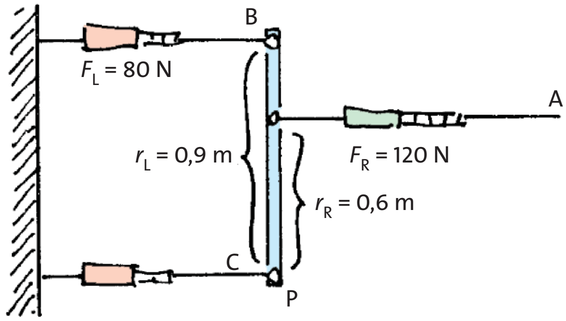


Abb. 7.19 Seil A möchte den Stab um den Drehpunkt P rechts herum drehen, Seil B links herum.

Seil A versucht, den Stab um den neuen Drehpunkt rechts herum zu drehen, Seil B versucht, links herum zu drehen. Die Hebelarme sind also

$$r_R = 0{,}6 \text{ m und } r_L = 0{,}9 \text{ m.}$$

Die Impulsstromstärken kennen wir schon. Es ist

$$F_R = 120 \text{ N und } F_L = 80 \text{ N.}$$

Das Rechtsdrehmoment

$$r_R \cdot F_R = 0{,}6 \text{ m} \cdot 120 \text{ N} = 72 \text{ Nm}$$

ist tatsächlich gleich dem Linksdrehmoment:

$$r_L \cdot F_L = 0{,}9 \text{ m} \cdot 80 \text{ N} = 72 \text{ Nm.}$$

Du siehst übrigens, dass die Maßeinheit des Drehmoments Nm (sprich „Newton-Meter“) ist.

Wir legen den Drehpunkt schließlich noch in den oberen Einmündungspunkt, Abb. 7.20.

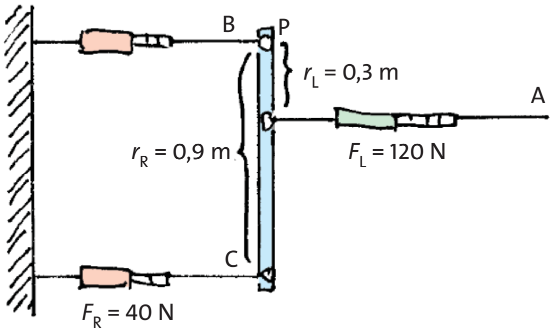


Abb. 7.20 Seil C möchte den Stab um den Drehpunkt P rechts herum drehen, Seil A links herum.

r_R = 0,9 m und r_L = 0,3 m.

Die zugehörigen Impulsstromstärken sind

F_R = 40 N und F_L = 120 N.

Daraus ergibt sich das Rechtsdrehmoment zu

$$r_R \cdot F_R = 0{,}9\ \text{m} \cdot 40\ \text{N} = 36\ \text{Nm}$$

und das Linksdrehmoment:

$$r_L \cdot F_L = 0{,}3\ \text{m} \cdot 120\ \text{N} = 36\ \text{Nm}.$$

Wieder sind beide Drehmomente gleich, das Hebelgesetz wird befolgt.

Beispiel: Belastete Stange

Ein schwerer Körper (m = 80 kg) hängt an einer waagrechten Stange, Abb. 7.21. Das Gewicht der Stange sei, verglichen mit dem des Körpers, so gering, dass wir es nicht zu berücksichtigen brauchen. Wie stark werden die Auflagepunkte der Stange belastet?

Als Drehpunkt wählen wir den Punkt der Stange, wo die Last hängt. Der Impulsstrom, der von der Last zum Punkt P fließt, hat die Stärke

$$F_P = m \cdot g = 80\ \text{kg} \cdot 10\ \text{N/kg} = 800\ \text{N}.$$

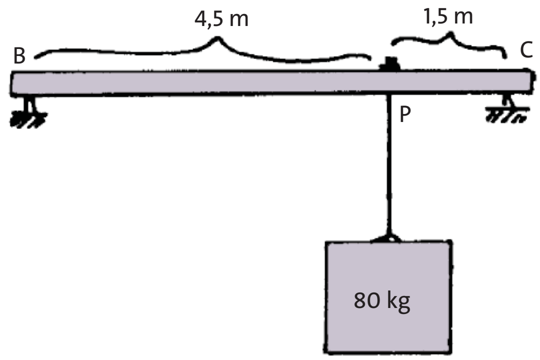


Abb. 7.21 Der Impulsstrom, der von P aus in Richtung C fließt, ist dreimal so stark wie der, der zu B fließt.

Das Lager C versucht, die Stange links herum zu drehen, das Lager B versucht, rechts herum zu drehen. Die Hebelarme sind daher:

r_R = 4,5 m und r_L = 1,5 m.

Das Hebelgesetz liefert

$$\frac{F_L}{F_R} = \frac{r_R}{r_L} = \frac{4{,}5\ \text{m}}{1{,}5\ \text{m}} = 3{,}0.$$

Also: $F_L = 3\,F_R$.

Der Impulsstrom von 800 N, der bei P in die Stange hineinfließt, teilt sich so auf: Zum Auflagepunkt C fließt dreimal so viel Impuls wie in Richtung B.

Damit $F_P = F_R + F_L$, erfüllt ist, muss daher

F_R = 200 N

und

F_L = 600 N

sein.

Beispiel: Zange

Eine Zange besteht aus zwei in einem Gelenk miteinander verbundenen Hebeln, Abb. 7.22. Wir betrachten den einen davon, und zwar Hebel 1.

Um einen Nagel durchzukneifen, werden die Griffe der Zange in einem Abstand von 20 cm vom Gelenk zusammengedrückt. Der Impulsstrom, der in die Griffe fließt, habe eine Stärke von 30 N. Die Schneiden der Zange haben vom

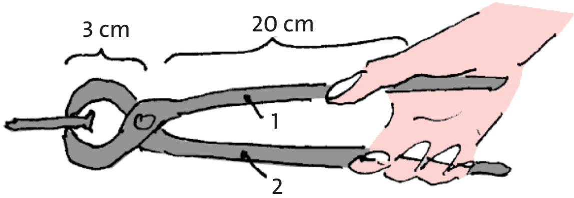


Abb. 7.22 Eine Zange besteht aus zwei Hebeln. Jeder dieser Hebel hat einen kurzen und einen langen Hebelarm.

Gelenk einen Abstand von 3 cm. Wir legen P ins Gelenk, sodass

$$r_R = 0{,}2\ \text{m},\ r_L = 0{,}03\ \text{m und } F_R = 30\ \text{N}.$$

ist. Die Impulsstromstärke am Nagel berechnet sich zu

$$F_L = \frac{r_R}{r_L} F_R = \frac{0{,}2\ \text{m}}{0{,}03\ \text{m}} 30\ \text{N} = 200\ \text{N}.$$

> Mit einem Hebel kann ein kleiner Impulsstrom einen großen erzeugen.

Das Hebelgesetz lässt sich noch auf andere Situationen anwenden: Erstens brauchen die Einmündungspunkte nicht in einer geraden Reihe zu liegen, und zweitens brauchen die drei Vektoren der Impulsstromstärke nicht parallel zueinander zu sein.

Abb. 7.23 zeigt eine Art Hebel, in den drei Impulsströme einmünden. Wir wählen als Drehpunkt das Lager, das an der Wand befestigt ist. Das obere Seil versucht eine Linksdrehung, das untere Seil eine Rechtsdrehung zu verursachen.

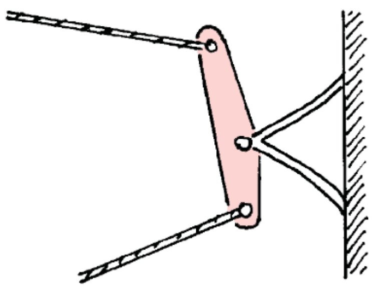


Abb. 7.23 Die Einmündungspunkte der Impulsströme brauchen nicht auf einer Gerade zu liegen, und die Stromstärkevektoren brauchen nicht parallel zu sein.

Welches sind hier die Hebelarme? Man zieht durch die beiden Punkte, wo die Seile befestigt sind, je eine Gerade, und zwar so, dass ihre Richtung gleich der Richtung des entsprechenden Stromstärkevektors ist, Abb. 7.24.

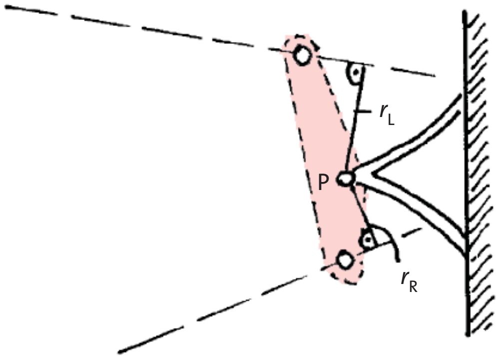


Abb. 7.24 Wie Abb. 7.23, aber mit Hilfslinien und Hebelarmen

Die Hebelarme sind nun einfach die Abstände der Geraden vom Drehpunkt P.

Beispiel: Umlenkhebel

Wie stark ist der Impulsstrom in dem waagrechten Seil in Abb. 7.25?

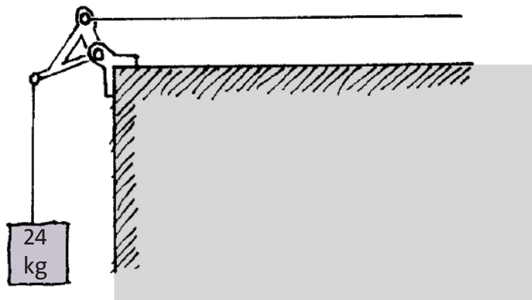


Abb. 7.25 Umlenkhebel

Wir wählen als Drehpunkt willkürlich den Punkt, wo der Umlenkhebel befestigt ist, Abb. 7.26. Das waagrechte Seil versucht eine Rechtsdrehung, das senkrechte eine Linksdrehung um P hervorzurufen. In Abb. 7.26 sind die Hilfslinien und die Hebelarme eingezeichnet. Man entnimmt der Abbildung:

$$r_R = 0{,}2\ \text{m und } r_L = 0{,}4\ \text{m}.$$

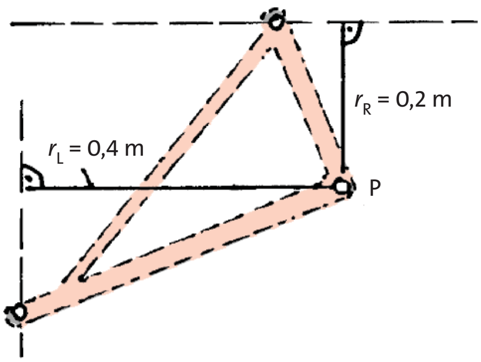


Abb. 7.26 Wie Abb. 7.23, aber mit Hilfslinien und Hebelarmen

Der Impulsstrom im senkrechten Seil hat die Stärke:

$$F_L = m \cdot g = 24 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 240 \text{ N}.$$

Mit dem Hebelgesetz wird

$$\frac{F_L}{F_R} = \frac{r_R}{r_L} = \frac{0{,}2 \text{ m}}{0{,}4 \text{ m}} = 0{,}5.$$

Man könnte noch fragen, wie stark die Aufhängung belastet ist, d. h. nach der Impulsstromstärke an der Stelle P. Da die Stromstärkevektoren in den beiden Seilen nicht parallel zueinander sind, dürfen wir hier nicht einfach die Beträge F_R und F_L addieren; wir müssen vektoriell addieren:

$$\vec{F}_P = \vec{F}_R + \vec{F}_L.$$

Aufgaben

1. Abb. 7.27 zeigt einen Teil einer Fahrzeugbremse. Über eine Stange zieht man an einem Hebel. Der Hebel zieht über ein Seil an den Bremsen, die sich an den Rädern befinden. Wie stark muss der Impulsstrom in der Zugstange sein, damit im Bremsseil ein Strom von 50 N fließt?
2. Der Brückenkran in Abb. 7.28 überspannt die ganze 12 m breite Fabrikhalle. Am Kran hängt eine Last von 9 Tonnen (1 Tonne = 1000 kg). Wie stark werden die Schienen auf den beiden Seiten (zusätzlich zur Last des Krans) belastet, wenn die Last in der Mitte hängt? Wie stark werden sie belastet, wenn die Last von der linken Schiene einen Abstand von 4 m hat?

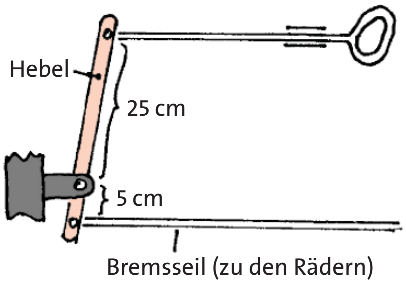


Abb. 7.27 Zu Aufgabe 1

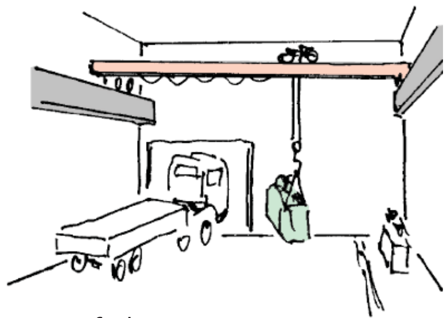


Abb. 7.28 Zu Aufgabe 2

Aufgaben

3. Die Griffe des Nussknackers, Abb. 7.29, werden in einem Abstand von 15 cm von der Nuss zusammengedrückt. Damit die Nuss knackt, muss ein Impulsstrom von 80 N durch sie hindurchfließen. Wie stark muss man drücken?
4. An einer waagrechten Stange hängt eine Last. Die Stange ist an zwei Punkten befestigt, Abb. 7.30. Bei A drückt sie nach unten, bei B nach oben. Das heißt, dass die Impulsstromstärkevektoren in A und B senkrecht liegen — genauso wie in dem Seil, an dem die Last hängt. Wie stark sind die Punkte A und B belastet? (Wie stark sind die Impulsströme, die bei A und bei B aus der Stange fließen?) Lege den Drehpunkt in A, um die Stromstärke bei B zu berechnen und in B, um die Stromstärke bei A zu berechnen.
5. An einer Stange, die von einem Seil gehalten wird, hängt eine 8 kg schwere Lampe, Abb. 7.31. Wie stark ist der Impulsstrom, der durch das Seil fließt? Wähle als Drehpunkt die Stelle, wo die Stange an der Mauer befestigt ist.
6. Wozu dient ein Schraubenschlüssel? Warum zieht man die Mutter nicht mit der Hand fest?

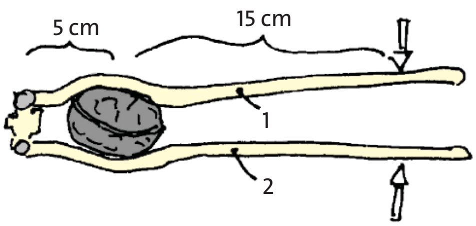


Abb. 7.29 Zu Aufgabe 3

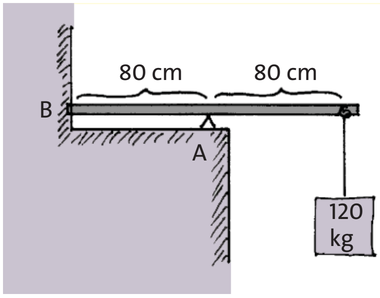


Abb. 7.30 Zu Aufgabe 4

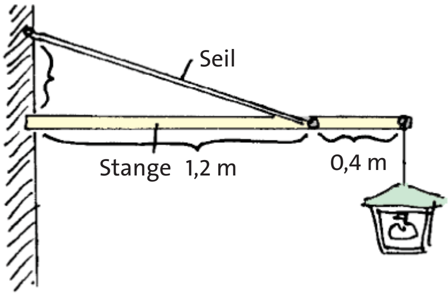


Abb. 7.31 Zu Aufgabe 5

7.4 Gleichgewicht

In Abb. 7.32 ist alles in Ordnung. Rechts und links fließt je ein Impulsstrom von 50 N in den Stab hinein, bei P fließen 100 N heraus. Das Hebelgesetz

$$r_R \cdot F_R = r_L \cdot F_L$$

ist erfüllt.

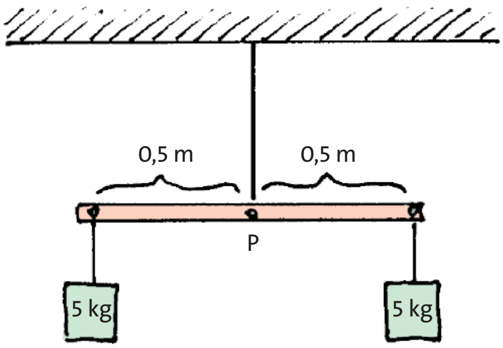


Abb. 7.32 Das Hebelgesetz ist erfüllt, die Stange ist im Gleichgewicht.

Wir wollen nun versuchen, das Hebelgesetz zu verletzen: Es kann uns doch niemand daran hindern, zwei verschieden schwere Körper an den Stab zu hängen, Abb. 7.33a. Die Natur wehrt sich aber gegen diese Verletzung des Hebelgesetzes. Wie du sicher schon vorausgesehen hast, passiert das, was Abb. 7.33b zeigt: Die Körper setzen sich, samt der Stange, in Bewegung. In anderen Worten, die Anordnung bleibt nicht im Gleichgewicht — im Gegensatz zu der in Abb. 7.32.

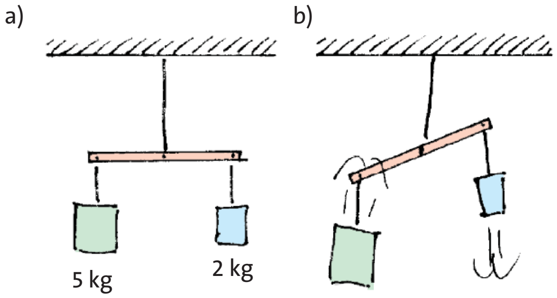


Abb. 7.33 (a) Ein Versuch, das Hebelgesetz zu verletzen (b) Körper und Stange setzen sich in Bewegung.

Auch bei der Situation in Abb. 7.34 wird das Hebelgesetz befolgt, die Anordnung bleibt im Gleichgewicht — diesmal mit verschieden langen Hebelarmen.

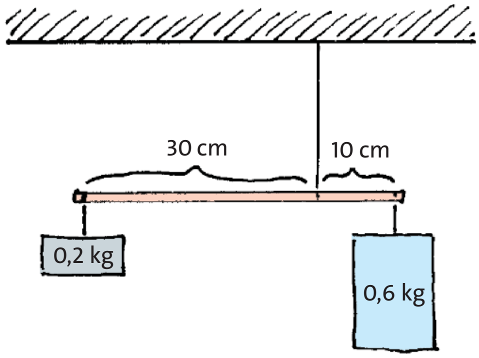


Abb. 7.34 Gleichgewicht mit verschieden langen Hebelarmen

Wir können damit das Hebelgesetz etwas genauer formulieren:

> Ein drehbar aufgehängter Körper ist im Gleichgewicht, wenn das Rechts- gleich dem Linksdrehmoment ist.

Aufgaben

1. Berechne Rechts- und Linksdrehmoment für den Stab in Abb. 7.35. Befindet er sich im Gleichgewicht?
2. Mit dem Hebel in Abb. 7.36 will Lilly einen 500 kg schweren Stein anheben. Nimm an, dass die Hälfte der Masse des Steins auf dem Hebel lastet. Schafft es Lilly? (Sie wiegt 50 kg.)

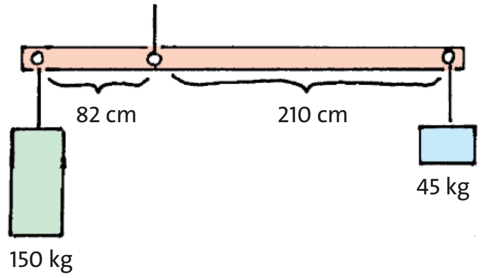


Abb. 7.35 Zu Aufgabe 1

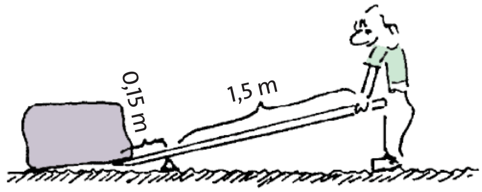


Abb. 7.36 Zu Aufgabe 2

7.5 Der Schwerpunkt

Der Stab in Abb. 7.37a ist im Gleichgewicht. Vergleiche die Situation mit der in Abb. 7.37b. Das Einzige, was sich geändert hat: Die Kugeln hängen nicht mehr an zwei Schnüren, sondern sind an der Stange befestigt; sie bilden mit der Stange zusammen einen einzigen Körper, eine Art Hantel.

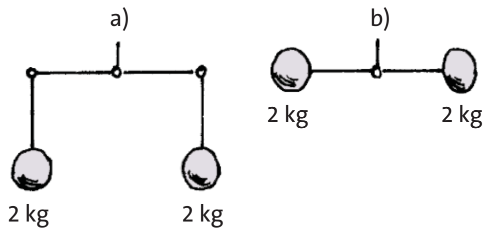


Abb. 7.37 (a) Der Stab ist im Gleichgewicht. (b) Der hantelförmige Körper ist im Gleichgewicht.

Auch diese Hantel ist natürlich im Gleichgewicht. Es fließen zwei Impulsströme an den Enden in die Hantel hinein. (Sie kommen aus der Erde.) Sie treffen sich im Drehpunkt und verlassen dort die Hantel nach oben.

Noch einmal dasselbe in anderen Worten: Wir haben einen einzigen Körper in einem Punkt drehbar aufgehängt, und dieser Körper ist im Gleichgewicht: Er gerät nicht von selbst in Drehung.

Wir verdrehen nun die Hantel etwas, Abb. 7.38a. Was passiert, wenn wir sie loslassen? Gar nichts. Sie bleibt in ihrer neuen Lage stehen, sie ist immer noch im Gleichgewicht. Man sieht das anhand von Abb. 7.38b. Die Stellen, wo die beiden Impulsströme einmünden, sind dort, wo die beiden Kugeln sitzen. Die Stromstärkevektoren liegen senkrecht; daher die senkrechten Hilfslinien. Beide Hebelarme r_R und r_L sind kürzer als in Teilbild a). Sie sind aber im selben Verhältnis kürzer geworden: r_R hat sich beim Verdrehen auf die Hälfte verkürzt und r_L hat sich auf die Hälfte verkürzt.

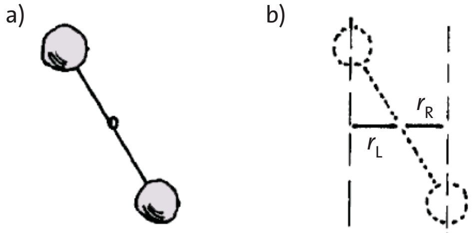


Abb. 7.38 Beim Verdrehen haben sich die Hebelarme auf die Hälfte verkürzt.

F_R und F_L sind beim Verdrehen natürlich gleich geblieben. Die Drehmomente $r_R \cdot F_R$ und $r_L \cdot F_L$ haben daher beide auf den halben Wert abgenommen, und das heißt, dass nach wie vor

$$r_R \cdot F_R = r_L \cdot F_L$$

gilt. Wir können die Hantel drehen, wie wir wollen — sie bleibt im Gleichgewicht.

Wenn es das Lager im Drehpunkt zulässt, können wir sie auch in die dritte Dimension verdrehen, in Abb. 7.38 aus der Zeichenebene heraus.

Auch das ändert nichts daran, dass sie im Gleichgewicht bleibt.

Nun noch einmal dieselbe Hantel, Abb. 7.39a, aber mit einem anderen Drehpunkt. Sie ist jetzt nicht mehr im Gleichgewicht, und ebenfalls nicht in Abb. 7.39b. Es gibt nur einen einzigen Drehpunkt, für den sie, unabhängig von ihrer Orientierung, im Gleichgewicht bleibt. Diesen Punkt nennt man ihren Schwerpunkt.

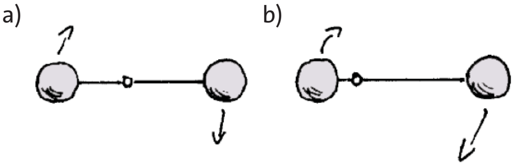


Abb. 7.39 Noch einmal der Körper von Abb. 7.37b. Nur der Drehpunkt wurde anders gewählt.

Einen Schwerpunkt haben nicht nur hantelförmige Körper. Jeder Gegenstand hat einen Schwerpunkt, und zwar einen einzigen. Wenn man den Gegenstand in diesem Punkt drehbar aufhängt, ist er im Gleichgewicht, und er bleibt es – auch wenn man ihn verdreht.

Häufig befindet sich der Schwerpunkt eines Körpers in seinem Innern. Wie kann man den Körper dann um diesen Punkt drehbar aufhängen?

Man bohrt ein Loch, das durch den Schwerpunkt geht, und steckt eine Achse durch das Loch. Die Achse wird drehbar gelagert. Der Körper ist nun wieder im Gleichgewicht, egal, wie man ihn dreht, Abb. 7.40.

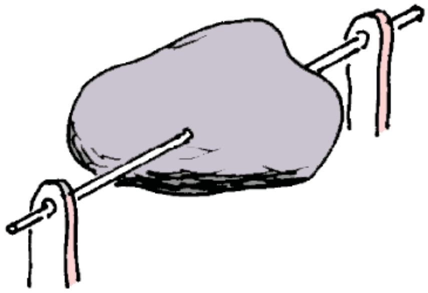


Abb. 7.40 Die Achse läuft durch den Schwerpunkt. Der Körper ist in jeder Stellung im Gleichgewicht.

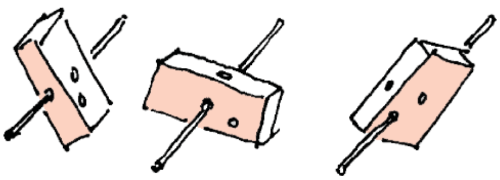


Abb. 7.41 Verschiedene Achsen durch den Schwerpunkt: Der Körper ist immer im Gleichgewicht.

Es gibt viele Möglichkeiten, solche Löcher zu bohren. Es ist aber gleichgültig, wie man sie bohrt. Wichtig ist nur, dass sie durch den Schwerpunkt gehen, Abb. 7.41.

Wir fassen zusammen:

> Jeder Körper hat genau einen Schwerpunkt. Wenn man ihn um den Schwerpunkt drehbar aufhängt, bleibt der Körper im Gleichgewicht, egal, in welche Richtung man ihn dreht.

Wenn ein Gegenstand hinreichend symmetrisch ist, ist die Lage des Schwerpunkts leicht vorauszusagen.

Bei einer Kugel, einem Würfel, einem Zylinder oder einem Quader zum Beispiel ist es einfach der geometrische Mittelpunkt, Abb. 7.42.

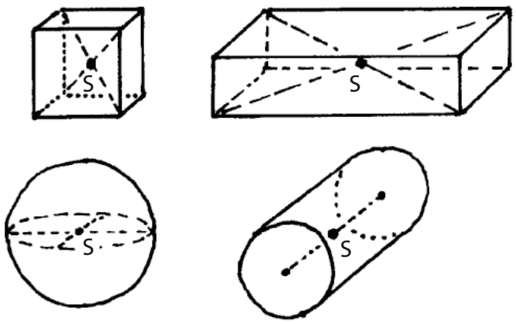


Abb. 7.42 Der Schwerpunkt ist bei diesen Körpern der geometrische Mittelpunkt.

Vorausgesetzt ist dabei allerdings, dass die Masse in dem Körper gleichmäßig verteilt ist. Besteht ein Würfel zur einen Hälfte aus Blei, zur anderen aus Aluminium, Abb. 7.43, so liegt sein Schwerpunkt nicht mehr in der Mitte; er ist ins Blei hinein verschoben.

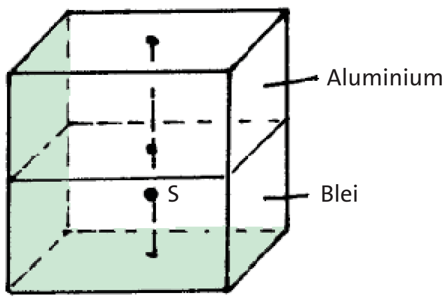


Abb. 7.43 Der Schwerpunkt ist nicht der Mittelpunkt Aluminium des Würfels.

Bei vielen Körpern liegt der Schwerpunkt außerhalb des Materials, aus dem der Körper besteht, zum Beispiel bei einem Kreisring oder einem U-förmigen Gegenstand, Abb. 7.44.

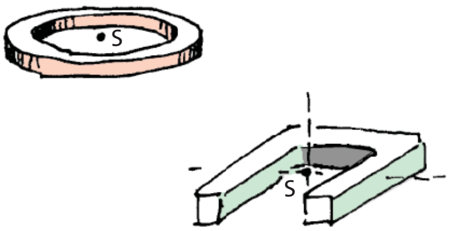


Abb. 7.44 Hier liegt der Schwerpunkt S außerhalb des jeweiligen Gegenstandes.

Aufgaben

1. Wo liegt der Schwerpunkt des Rades eines Fahrrades?
2. Wo liegt der Schwerpunkt der Erde?
3. Versuche, für verschiedene Gegenstände die Lage des Schwerpunktes zu finden, indem du sie mit Daumen und Mittelfinger so festhältst, dass sie sich drehen können.
4. Man kann sich Erde und Mond als eine Hantel vorstellen: Die „Stange“ zwischen den beiden Himmelskörpern ist das Schwerefeld. Wo liegt der Schwerpunkt dieses Gebildes? (Masse der Erde: etwa 100-mal Masse des Mondes, Abstand Erde — Mond = 380 000 km)

7.6 Das stabile Gleichgewicht

Wir hängen einen Gegenstand drehbar auf, wählen aber als Drehpunkt absichtlich nicht den Schwerpunkt. Der Einfachheit halber nehmen wir wieder eine Hantel. Damit der Drehpunkt nicht mit dem Schwerpunkt zusammenfällt, hat die Hantel einen Knick, Abb. 7.45.

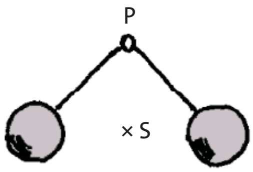


Abb. 7.45 Der Drehpunkt P fällt nicht mit dem Schwerpunkt zusammen. Der Körper ist im stabilen Gleichgewicht.

Was passiert, wenn man die Hantel in die Stellung dreht, die Abb. 7.46a zeigt? Dein Gefühl sagt dir sicher, dass sie so nicht hängen bleibt: Sie beginnt, sich zu drehen und pendelt sich in die Lage ein, die in Abb. 7.45 dargestellt ist.

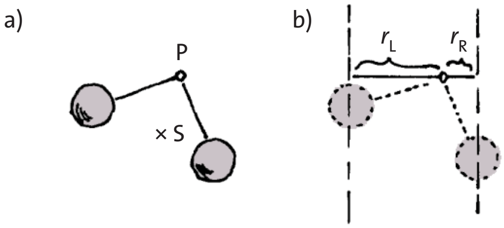


Abb. 7.46 (a) Der Körper bleibt nicht in dieser Stellung. (b) Ein Hebelarm ist länger als der andere.

Du brauchst dich aber nicht auf dein Gefühl zu verlassen, um zu diesem Schluss zu kommen. Abb. 7.46b zeigt, dass der Hebelarm r_L länger ist als r_R. Da die Kugeln gleich schwer sind, bedeutet dies, dass das Linksdrehmoment größer ist als das Rechtsdrehmoment. Die Hantel beginnt daher, sich links herum zu verdrehen. Beim Drehen ändert sich die Länge der Hebelarme. Wenn die Hantel die in Abb. 7.45 wiedergegebene Stellung erreicht hat, sind die Hebelarme wieder gleich lang. Dies ist die Gleichgewichtslage. Die Hantel wird zunächst noch über die Gleichgewichtslage hinausschwingen, sich dann aber nach und nach in diese Lage einpendeln.

Was macht der Schwerpunkt bei diesem Vorgang? Er bewegt sich nach unten.

Dreht man den Körper aus der Gleichgewichtslage heraus, so nimmt die Höhe des Schwerpunkts zu, egal, ob man den Körper nach rechts oder nach links dreht. In der Gleichgewichtslage hat also der Schwerpunkt die tiefste Lage, die er haben kann. Außerdem liegt er genau unter dem Drehpunkt.

Es gibt noch eine andere Gleichgewichtslage für die Hantel: wenn der Schwerpunkt genau senkrecht über dem Drehpunkt liegt, Abb. 7.47.

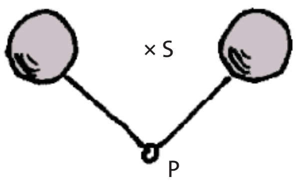


Abb. 7.47 Instabile Gleichgewichtslage

Wenn man ihn aus dieser Lage ein wenig herausdreht, kehrt er aber nicht von selbst in die Ausgangslage zurück, sondern entfernt sich noch mehr von ihr, und pendelt sich schließlich auf die untere Gleichgewichtslage ein. Die obere Gleichgewichtslage ist instabil, die untere stabil.

> Ein Körper ist drehbar aufgehängt. Liegt der Drehpunkt senkrecht über dem Schwerpunkt, so befindet sich der Körper im stabilen Gleichgewicht. Dreht man ihn etwas aus dieser Gleichgewichtslage heraus, so pendelt er von selbst wieder zurück.

Wir haben damit eine sehr bequeme Methode zur Verfügung, die Lage des Schwerpunkts eines Körpers zu bestimmen. Man hängt den Körper an einem beliebigen Punkt drehbar auf, Abb. 7.48. Er pendelt sich dann so ein, dass sein Schwerpunkt senkrecht unter dem Drehpunkt liegt. Man kennt damit also schon eine Gerade, auf der der Schwerpunkt liegen muss. Man hängt ihn dann an einem anderen Punkt drehbar auf und lässt ihn sich einpendeln. Man erhält wieder eine Gerade, auf der der Schwerpunkt liegt. Er muss damit im Schnittpunkt der beiden Geraden liegen.

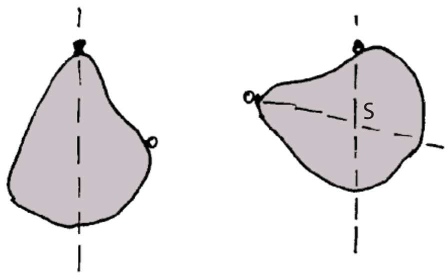


Abb. 7.48 Der Körper pendelt sich immer so ein, dass sein Schwerpunkt senkrecht unter S dem Drehpunkt liegt.

Aufgaben

1. Versuche die Schwerpunkte verschiedener Gegenstände zu bestimmen, indem du jeden von ihnen nacheinander an zwei Punkten drehbar aufhängst.
2. Zwei Gabeln werden in einen Korken gestochen, der Korken wird auf die Spitze eines Nagels gesetzt, Abb. 7.49. Warum fällt der Korken mit den Gabeln nicht herunter?

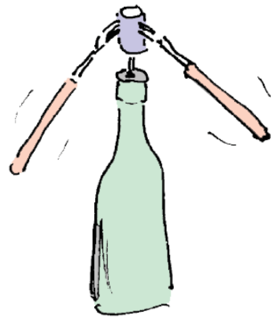


Abb. 7.49 7u Aufgabe 2

7.7 Schwerpunkt und Energie

Um einen Körper aus einer stabilen Gleichgewichtslage herauszubringen, braucht man Energie. Das hängt damit zusammen, dass dabei der Schwerpunkt nach oben bewegt werden muss.

Es ist ähnlich, wie wenn man einen beliebigen Körper anhebt, Abb. 7.50. Auch dabei wird der Schwerpunkt nach oben verschoben, und auch dabei braucht man Energie.

Abb. 7.50 Um den Schwerpunkt eines Körpers nach oben zu bewegen, braucht man Energie.

> Um den Schwerpunkt eines Körpers nach oben zu verschieben, braucht man Energie.

Diese Energie wird im Schwerefeld gespeichert. Wenn sich der Körper wieder nach unten bewegt, gibt das Schwerefeld die Energie wieder zurück.

Warum läuft nun der linke Vorgang in Abb. 7.51 von selbst ab, der rechte aber nicht? Warum läuft der linke Vorgang in Abb. 7.52 von selbst ab und der rechte nicht?

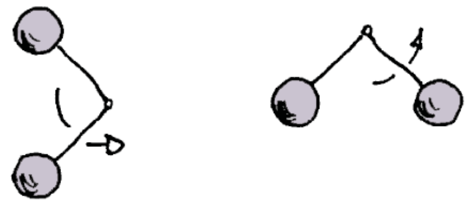


Abb. 7.51 Der Vorgang links läuft von selbst ab, der rechts nicht.

Abb. 7.52 Der Vorgang links läuft von selbst ab, der rechts nicht.

Weil es immer leichter ist, Energie loszuwerden, als Energie zu bekommen. (Mit der Energie ist es ähnlich wie mit dem Geld.) Die Energie, die beim Übergang in die stabile Gleichgewichtslage abgegeben wird, wird zur Erzeugung von Wärme verwendet. Dieser Vorgang kann aber nicht rückwärts ablaufen, Wärme kann man nicht vernichten. Daher läuft der Übergang vom Gleichgewicht ins Nichtgleichgewicht nicht von selbst ab. Man muss die Energie irgendwo anders her beschaffen.

Wir betrachten den Übergang ins Gleichgewicht an einigen Beispielen.

Abb. 7.53 (a) Die Kugel rollt an die tiefste Stelle der Mulde. (b) Das Fahrzeug pendelt sich so ein, dass es waagrecht steht

In Abb. 7.53a rollt die Kugel an die tiefste Stelle. Hier hat auch ihr Schwerpunkt die tiefst mögliche Lage. Das „Fahrzeug“ in Abb. 7.53b verschiebt sich so, dass es waagrecht steht. Dazu müssen zwar die linken Räder ein Stück bergauf fahren. Der Schwerpunkt wandert dabei aber nach unten. Die Kiste in Abb. 7.54a bleibt natürlich nicht so, wie sie dort gerade ist. Sie kippt nach links.

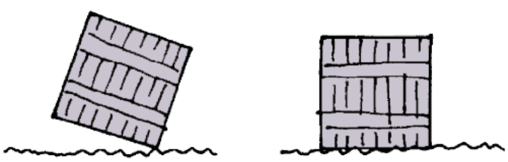


Abb. 7.54 Die Kiste kippt nach links. Dabei wandert der Schwerpunkt nach unten.

Dabei bewegt sich ihr Schwerpunkt nach unten. Auch der Gegenstand in Abb. 7.55a bleibt nicht so liegen, wie er dort gerade liegt, denn sein Schwerpunkt hat die Möglichkeit, noch weiter nach unten zu gehen, Abb. 7.55b.

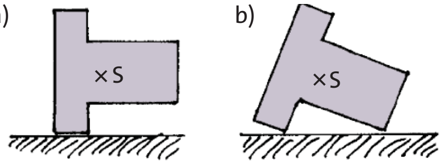


Abb. 7.55 Der Gegenstand kippt nach rechts, weil dadurch sein Schwerpunkt abgesenkt wird.

Manchmal braucht man den Schwerpunkt eines Körpers nur sehr wenig anzuheben, um ihn in eine Lage zu bringen, von der aus er von selbst sehr viel weiter nach unten gehen kann. In anderen Worten: Man braucht dem Körper nur sehr wenig Energie zuzuführen, um dann sehr viel mehr Energie herauszubekommen.

Abb. 7.56 zeigt eine solche Situation. Man braucht nur wenig Energie, um die Kugel die kleine Erhöhung hinaufzubewegen; danach rollt sie von selbst die Außenseite des Berges hinunter.

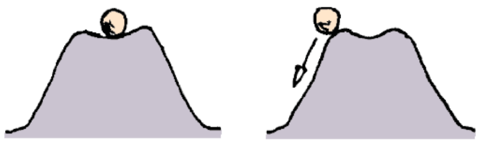


Abb. 7.56 Man braucht nur wenig Energie, um die Kugel über den Rand zu rollen.

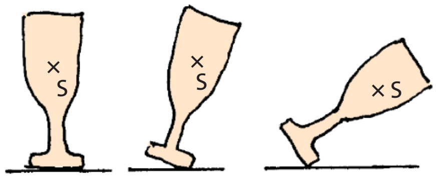


Abb. 7.57 Man braucht nur wenig Energie, um die Vase zum Umzukippen zu bringen.

Ein anderes, sehr bekanntes Beispiel: ein kippliger Gegenstand, Abb. 7.57. Auch hier braucht man den Schwerpunkt nur wenig nach oben zu bringen, damit die Vase in eine Position gerät, von der aus der Schwerpunkt von selbst viel weiter nach unten gehen kann.

Wir haben damit eine Methode, die Masse eines Körpers zu bestimmen. Abb. 7.58 zeigt eine alte Balkenwaage. Der mittlere Drehpunkt des Waagebalkens liegt etwas höher als die beiden Drehpunkte, an denen die Waagschalen hängen.

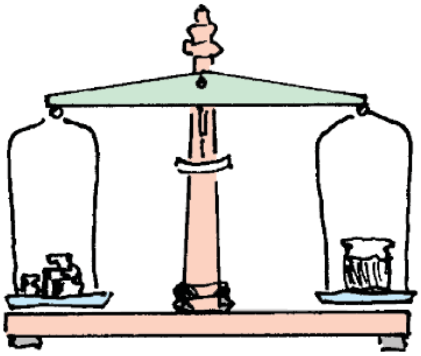


Abb. 7.58 Balkenwaage. Der mittlere Drehpunkt des Balkens liegt etwas höher als die äußeren Drehpunkte.

Wenn die Waagschalen gleich belastet sind, pendelt sich die Waage so ein, dass der Balken genau waagrecht liegt. Dann hat der Schwerpunkt nämlich seine tiefste Lage.

Zur Waage selbst gehört ein Gewichtssatz: ein Satz von Körpern bekannter Masse, aus denen man die verschiedensten Massenwerte zusammensetzen kann — ähnlich wie man mit verschiedenen Geldscheinen und Münzen die verschiedensten Geldbeträge zusammenstellen kann.

Um einen Gegenstand zu wägen, legt man ihn auf die eine der beiden Waagschalen. Auf die andere legt man Gewichte, und zwar so, dass der Balken genau waagrecht steht. Man weiß, dass dann die Masse des Körpers gleich der Gesamtmasse der Gewichtsstücke ist.

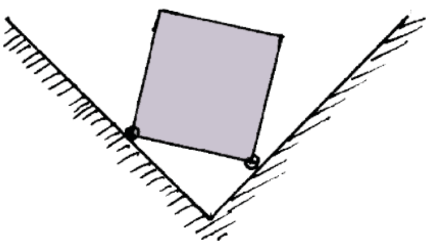


Abb. 7.59 Zu Aufgabe 3

Aufgaben

1. Wenn der Schwerpunkt beim Bewegen eines Körpers seine Höhe beibehält, so sagt man, der Körper befinde sich im indifferenten Gleichgewicht. Der Körper bleibt dann in jeder Lage, in die man ihn bringt, in Ruhe. Gib Beispiele hierfür an.
2. Ein frei stehendes Fahrrad kippt um, ein Auto nicht. Warum?
3. Befindet sich der Körper in Abb. 7.59 in einer stabilen Gleichgewichtslage? Wenn nicht — in welche Richtung setzt er sich in Bewegung?
4. Kippt der Körper in Abb. 7.60 um?
5. Manche Waagen haben verschieden lange Hebelarme, Abb. 7.61. Die Gewichtsstücke werden in die Schale gelegt, die an dem längeren Hebelarm hängt. Wie bestimmt man die Masse des zu wägenden Gegenstandes? Welchen Vorteil hat die Waage gegenüber einer Waage mit gleich langen Hebelarmen?

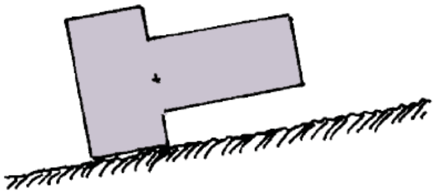


Abb. 7.60 Zu Aufgabe 4

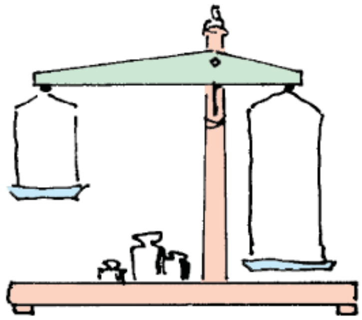


Abb. 7.61 Zu Aufgabe 5

8 DREHIMPULS UND DREHIMPULSSTRÖME

Es geht in diesem Kapitel um eine besondere Art von Bewegungen: um Drehbewegungen. Dass Drehbewegungen an vielen Stellen stattfinden, dass sie besonders wichtig sind, wird dir klar sein. Wir werden eine interessante Entdeckung machen: Die Beschreibung von Drehbewegungen hat viel Ähnlichkeit mit der Beschreibung von geradlinigen Bewegungen. Man kann auch sagen, es existiert eine Analogie zwischen den entsprechenden Bereichen der Mechanik. Dank dieser Analogie können wir uns viel Arbeit sparen.

8.1 Drehimpuls und Winkelgeschwindigkeit

Auf eine Motorwelle ist ein Rad montiert; der Motor ist eingeschaltet, das Rad dreht sich gleichmäßig, Abb. 8.1. Was heißt aber „gleichmäßig“? Mit konstanter Geschwindigkeit — wirst du vielleicht sagen. Aber mit welcher Geschwindigkeit denn? Punkt B am Rand des Rades bewegt sich schnell, Punkt A in der Nähe des Zentrums bewegt sich langsamer. Das heißt, es gibt gar keine einheitliche Geschwindigkeit. Was wir suchen, ist also ein sinnvolles Maß für die Geschwindigkeit der Drehung.

Ein solches Maß ist der Winkel, der von einem Radius pro Sekunde „überstrichen“ wird, Abb. 8.2. Man nennt den Quotienten aus dem Winkel und der Zeitdauer, die das Rad braucht, um sich um diesen Winkel zu verdrehen, die Winkelgeschwindigkeit:

$$\text{Winkelgeschwindigkeit} = \frac{\text{Winkel}}{\text{Zeit}}$$

Für den Winkel selbst sind verschiedene Maße im Gebrauch. Am besten vertraut ist dir sicher das Grad. In unserem Zusammenhang ist es aber prak-

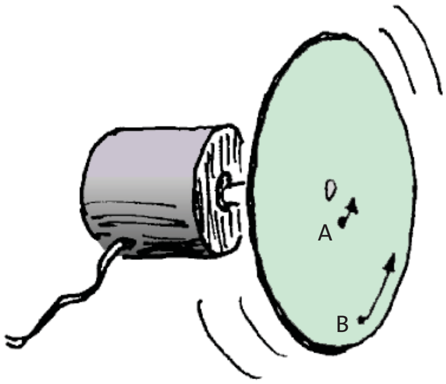


Abb. 8.1 Punkt B am Rand des Rades bewegt sich schneller als Punkt A.

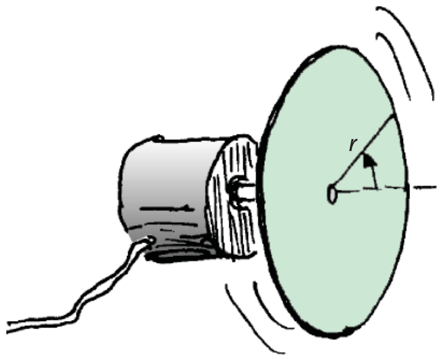


Abb. 8.2 Die Winkelgeschwindigkeit ist der vom Radius *r* überstrichene Winkel, geteilt durch die Zeitdauer.

tischer, die volle Umdrehung von 360° als Einheit zu nehmen. Wir geben also eine Winkelgeschwindigkeit an in „Umdrehungen pro Sekunde".

Wir betrachten ein gut gelagertes, frei laufendes Rad, zum Beispiel das Rad eines umgedrehten Fahrrades, Abb. 8.3. Es dreht sich mit einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit, d. h., es macht eine bestimmte Zahl von Umdrehungen pro Sekunde. Wir können den Wert der Winkelgeschwindigkeit mithilfe einer Stoppuhr bestimmen. Wir haben damit die Drehbewegung des Rades beschrieben.

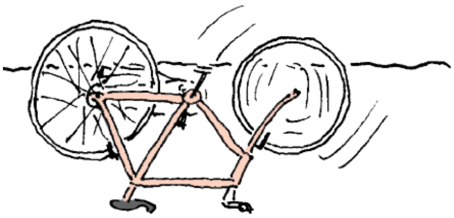


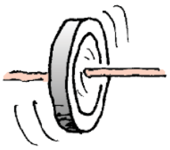
Abb. 8.3 Das sich drehende Rad hat eine bestimmte Menge Drehimpuls.

Die Winkelgeschwindigkeit ist für die Drehbewegung das, was die gewöhnliche Geschwindigkeit für die geradlinige Bewegung ist. Zur Beschreibung der geradlinigen Bewegung hatten wir aber noch eine zweite Größe eingeführt: den Impuls. Er ist ein Maß für den „Schwung", den ein Körper hat.

Genauso kann auch von unserem sich drehenden Rad sagen, es habe Schwung: etwas, das man hineinsteckt, wenn man es in Drehung versetzt, und das wieder herauskommt, wenn man das Rad abbremst. Diese Art Schwung nennt man Drehimpuls.

Drehimpuls und gewöhnlicher Impuls sind nicht dasselbe. Wenn das Rad in Abb. 8.4a gewöhnlichen Impuls hätte, müsste es sich so bewegen, wie es Abb. 8.4b zeigt.

a)



b)

Abb. 8.4 (a) Das Rad hat Drehimpuls. (b) Das Rad hat gewöhnlichen Impuls.

Wir untersuchen die Eigenschaften des Drehimpulses. Wovon hängt er ab? Welche Wege nimmt er bei den verschiedensten Vorgängen?

Zwei völlig gleich gebaute Räder drehen sich verschieden schnell (mit verschiedener Winkelgeschwindigkeit), Abb. 8.5.

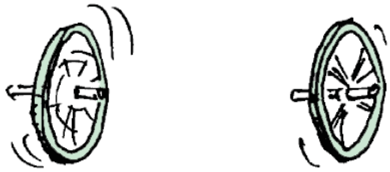


Abb. 8.5 Die Räder drehen sich verschieden schnell. Welches hat mehr Drehimpuls?

In welchem der beiden Räder steckt mehr Drehimpuls (Schwung)? Im schnelleren natürlich.

> Ein Körper enthält umso mehr Drehimpuls, je höher seine Winkelgeschwindigkeit ist.

Die beiden Räder in Abb. 8.6 haben die gleiche Form, aber sie sind aus verschiedenem Material, sodass das eine leicht, das andere schwer ist.

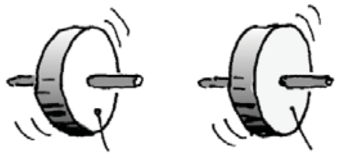


Abb. 8.6 Die Räder haben die gleiche Form, sind aber verschieden schwer. Welches enthält mehr Drehimpuls?

Sie werden nun so in Drehung versetzt, dass sie sich gleich schnell drehen. Welches enthält mehr Drehimpuls? Sicher das schwerere.

> Ein Körper enthält umso mehr Drehimpuls, je größer seine Masse ist.

Zwei Körper können die gleiche Masse haben und sich gleich schnell drehen, und trotzdem verschieden große Mengen an Drehimpuls enthalten. Wie das möglich ist, werden wir sehen, wenn wir etwas mehr Erfahrung im Umgang mit dem Drehimpuls haben.

Wir betrachten noch ein einfaches Experiment, Abb. 8.7. Wir brauchen zwei Räder — das Lager des einen ist am Tisch befestigt, das andere kann man herumtragen. Die beiden Räder können mit einer Art Rutschkupplung in Verbindung gebracht werden. Das eine Rad nimmt dann das andere mit.

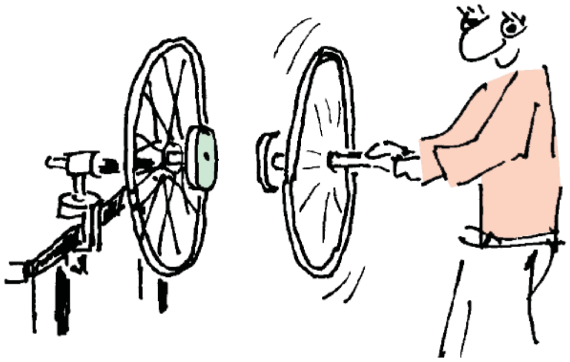


Abb. 8.7 Sobald sich die Kupplungsscheiben berühren, beginnt Drehimpuls vom rechten zum linken Rad zu fließen.

Die Räder sind zunächst getrennt. Das eine wird in Drehung versetzt, das andere nicht. Dann bringt man die Kupplungsscheiben in Berührung. Was passiert? Das sich drehende Rad wird langsamer, das andere, das sich anfangs nicht drehte, gerät in Drehung. Nachdem die Kupplungsscheiben eine Weile aneinander entlang gerutscht sind, erreichen sie schließlich dieselbe Winkelgeschwindigkeit.

Das war die Beobachtung. Wie ist nun die Erklärung? Was ist bei dem Vorgang mit dem Drehimpuls passiert?

Der Drehimpulsinhalt des Rades, das sich zu Anfang drehte, hat abgenommen. Der Drehimpuls des Rades, das sich nicht drehte, hat zugenommen. Es muss Drehimpuls vom einen zum anderen gelangt sein.

> Drehimpuls kann von einem auf einen anderen Körper übergehen.

Der Drehimpuls, der zu Anfang nur in dem einen Rad steckte, hat sich auf beide Räder gleichmäßig verteilt.

> Drehimpuls kann sich auf mehrere Körper verteilen.

Noch einmal ein einzelnes Rad, fest mit seiner Achse verbunden. Die Achse ist gut gelagert. Das Rad wird in Drehung versetzt, es wird mit Drehimpuls geladen. Man umfasst nun die rotierende Achse mit der Hand und „bremst", Abb. 8.8. Nach einer Weile kommt das Rad zum Stillstand. Wo ist der Drehimpuls geblieben?

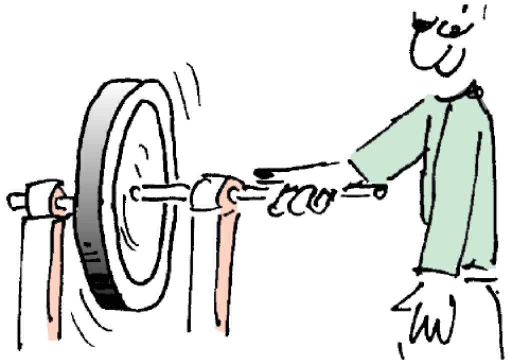


Abb. 8.8 Der Drehimpuls fließt in die Erde ab.

Die Situation ist ähnlich zu einer, die du kennst: wenn ein Fahrzeug, das sich geradlinig bewegt, bremst. Genauso, wie bei dem Fahrzeug der Impuls in die Erde abfließt, so fließt bei dem rotierenden Rad der Drehimpuls in die Erde ab.

Dasselbe wäre übrigens passiert, wenn man das Rad nicht absichtlich gebremst hätte. Dann wäre der Drehimpuls über die Lager in die Erde abgeflossen — nur langsamer.

Du siehst, wozu Radlager gut sind: Sie sollen eine Achse halten, ohne dass dabei Drehimpuls in die Erde abfließt.

> Ist ein Rad schlecht gelagert, sodass es von selbst zum Stillstand kommt, so fließt sein Drehimpuls in die Erde ab.

Noch einmal zu dem Experiment mit den beiden Rädern, Abb. 8.7. Wir versetzen das am Tisch befestigte Rad in Drehung. Dann versetzen wir auch das bewegliche Rad in Drehung — allerdings in die entgegengesetzte Richtung. Wir richten es so ein, dass die Zahl der Umdrehungen pro Sekunde für beide Räder gleich ist.

Wieder werden die Räder mithilfe der Rutschkupplung in Verbindung gebracht. Wie sieht diesmal der Endzustand aus? Beide Räder stehen still. Und die Erklärung? Vorher war doch Drehimpuls vorhanden. Wo ist der denn geblieben?

Jedes Rad für sich hatte am Anfang eine von null verschiedene Menge Drehimpuls. Wenn man aber die Drehimpulsmenge des einen Rades mit dem umgekehrten Vorzeichen versieht wie die des anderen, so war der Gesamtdrehimpuls auch am Anfang schon null. Wir schließen aus dem Experiment:

> Der Drehimpuls kann positive und negative Werte annehmen.

Welchen der beiden Werte wir als positiv und welchen als negativ bezeichnen, können wir willkürlich festlegen. Wie kann man eine solche Festlegung treffen? Eine sehr praktische Möglichkeit stellt die Rechte-Hand-Regel dar, Abb. 8.9:

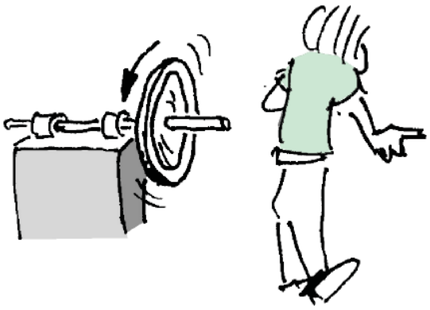


Abb. 8.9 Die Rechte-Hand-Regel

> Man umfasst mit der rechten Hand die Drehachse so, dass die gekrümmten Finger in die Drehrichtung weisen. Zeigt dann der Daumen in die positive x-Richtung, so ist der Drehimpuls positiv, zeigt er in die negative x-Richtung, so ist der Drehimpuls negativ.

Aufgabe

1. Suche zu den Merksätzen des vorangehenden Abschnitts die entsprechenden Merksätze in Abschnitt 3.2 dieses Buches, die sich auf geradlinige Bewegungen beziehen. Stelle die Sätze in einer Tabelle gegenüber.

8.2 Drehimpulspumpen

Drehimpuls fließt von selbst aus einem rotierenden Rad heraus: über die nie ganz perfekten Lager in die Erde. Um den Drehimpuls in das Rad hinein zu bekommen, muss man dagegen eine Anstrengung unternehmen. Von selbst setzt sich ein Rad nicht in Drehung.

Man kann ein Rad dadurch mit Drehimpuls laden, dass man es mit der Hand in Drehung versetzt, etwa mithilfe einer Kurbel. Eine andere Möglichkeit: Man überlässt die Arbeit einem Motor, Abb. 8.10.

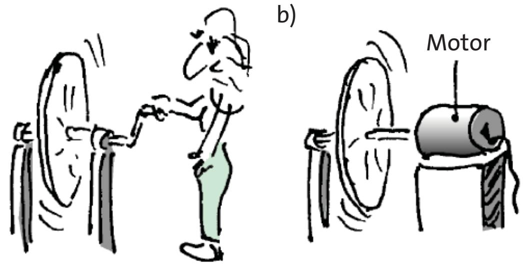


Abb. 8.10 (a) Lilly arbeitet als Drehimpulspumpe. (b) Der Motor arbeitet als Drehimpulspumpe

In beiden Fällen wird etwas gebraucht, das das Laden mit Drehimpuls erzwingt: eine Drehimpulspumpe. Im ersten Fall arbeitet Lilly als Drehimpulspumpe, im zweiten Fall der Motor.

Woher nimmt aber die Drehimpulspumpe den Drehimpuls? Es ist wie beim Impuls: Auch Drehimpuls kann aus der Erde geholt werden. Ein Versuch zeigt das sehr deutlich.

Wir legen die positive x-Achse senkrecht nach oben. Gebraucht werden ein Drehstuhl und ein recht großes, gut gelagertes Rad, das man an seiner Achse bequem halten kann. Willy steht neben dem drehbaren Hocker, hält das Rad so, dass die Achse senkrecht steht, und wirft es an. Dann setzt er sich auf den Drehstuhl, Abb. 8.11, und bremst das Rad ab, bis es stillsteht. Man beobachtet nun, dass er sich dabei selbst, zusammen mit dem Hocker, zu drehen beginnt. Die Erklärung dieser Beobachtung: Beim Bremsen ist Drehimpuls aus dem Rad abgeflossen, in Willy und den Drehstuhl hinein – aber nicht weiter. Er konnte nicht in die Erde fließen, weil der Drehstuhl durch das Lager von der Erde isoliert ist.

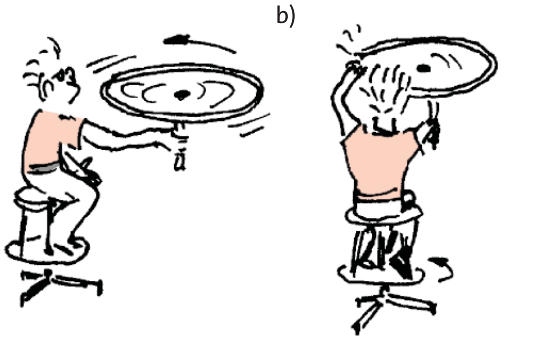


Abb. 8.11 (a) Nur das Rad hat Drehimpuls. (b) Aus dem Rad fließt Drehimpuls in Person und Stuhl.

Stützt sich Willy während des Bremsens des Rades am Fußboden ab, so kann der Drehimpuls direkt in die Erde abfließen.

Nun eine andere Variante des Experiments. Willy sitzt auf dem Drehstuhl und hält das Rad, Abb. 8.12. Drehstuhl und Rad sind zunächst in Ruhe. Das Rad wird nun von Willy in Drehung versetzt. Was passiert? Beim Andrehen beginnt sich der Drehstuhl zu drehen, zusammen mit Willy – allerdings in die der Raddrehung entgegengesetzte Richtung.

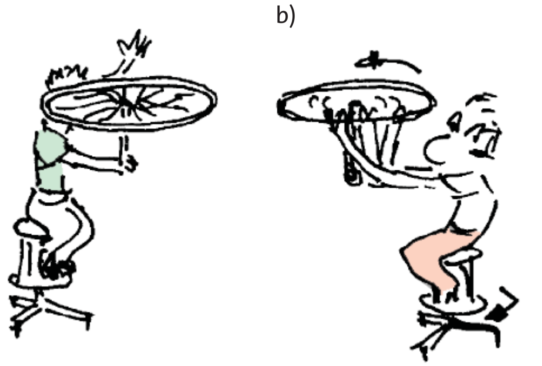


Abb. 8.12 (a) Rad, Willy und Stuhl ohne Drehimpuls. (b) Drehimpuls wird aus Willy und Stuhl in das Rad gepumpt.

Willy hat offensichtlich Drehimpuls aus dem Stuhl und aus sich selbst in das Rad befördert. Willy plus Stuhl haben jetzt negativen Drehimpuls.

Wenn sich Willy beim Laden des Rades wieder an der Erde abstützt, wird sich der Stuhl nicht drehen. Der Drehimpuls muss diesmal also direkt aus der Erde ins Rad gepumpt worden sein.

Abb. 8.13 Zur Aufgabe 1

Aufgabe

1. In Abb. 8.13 hält Willy in jeder Hand, mit der Achse nach oben, ein rotierendes Rad. Die Räder sind gleichartig gebaut. Ihre Winkelgeschwindigkeiten haben denselben Betrag, die Drehrichtungen sind aber entgegengesetzt. Während Willy auf dem Drehstuhl sitzt, bremst er beide Räder gleichzeitig ab. Was passiert? Was passiert beim Abbremsen, wenn sich die beiden Räder vorher in die gleiche Richtung gedreht haben?

8.3 Schwungräder

Ein rotierendes Rad enthält Drehimpuls. Es ist ein Drehimpulsspeicher. Manche Räder dienen ausschließlich dem Zweck, Drehimpuls zu speichern. Man nennt sie Schwungräder.

Wozu braucht man Schwungräder? Dampfmaschinen und Verbrennungsmotoren (Automotoren) pumpen den Drehimpuls nicht gleichmäßig, sondern stoßweise. Ein Automotor produziert pro Sekunde etwa 50 Drehimpulsstöße. Zwischen diesen Stößen gibt es kurze Zeitintervalle, in denen er nicht „pumpt". Damit er einen gleichmäßigen Drehimpulsstrom liefert, hat er ein Schwungrad. Während er viel Drehimpuls liefert, geht ein Teil des Drehimpulses ins Schwungrad hinein, während er wenig oder gar keinen liefert, kommt wieder etwas davon heraus.

Wie bringt man in einem Schwungrad möglichst viel Drehimpuls unter? Wir hatten schon gesehen: Ein Körper enthält umso mehr Drehimpuls, je schneller er sich dreht und je schwerer er ist. Also: Ein Schwungrad muss sich schnell drehen und eine große Masse haben.

Wir betrachten eine ganz einfache, etwas grobe Methode, Drehimpulsmengen zu vergleichen. Der zu untersuchende Körper sitzt auf einer gut gelagerten Achse, Abb. 8.14. Wir nehmen die Achse zwischen Daumen und Zeigefinger und bremsen, so stark es geht. Es dauert eine bestimmte Zeit, bis der Körper zum Stillstand gekommen ist. Je mehr Drehimpuls er enthält, desto länger dauert es, bis der ganze Drehimpuls herausgeflossen ist.

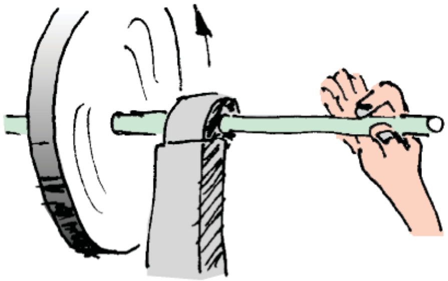


Abb. 8.14 Je länger es dauert, bis der rotierende Körper zum Stillstand kommt, desto mehr Drehimpuls enthält er.

Wir vergleichen nun jeweils zwei rotierende Körper.

- Die Körper sind völlig gleichartig gebaut. Der eine dreht sich schnell, der andere langsam. Natürlich dauert das Abbremsen des schnellen Körpers länger als das Abbremsen des langsamen, denn der schnelle Körper enthält mehr Drehimpuls als der langsame.
- Die Körper drehen sich gleich schnell, sind aber verschieden schwer. Das Abbremsen des schwereren dauert länger als das Abbremsen des leichteren, denn der schwere hatte mehr Drehimpuls als der leichtere.
- Wir vergleichen nun noch zwei Körper, die sich weder in der Masse noch in der Winkelgeschwindigkeit unterscheiden. Der einzige Unterschied besteht darin, dass bei dem einen Körper ein Teil der Masse weiter außen sitzt als beim anderen, Abb. 8.15. Das Ergebnis ist deutlich: Bei dem Körper, dessen Masse weiter außen sitzt, dauert das Abbremsen länger. Er enthielt also mehr Drehimpuls als der andere.

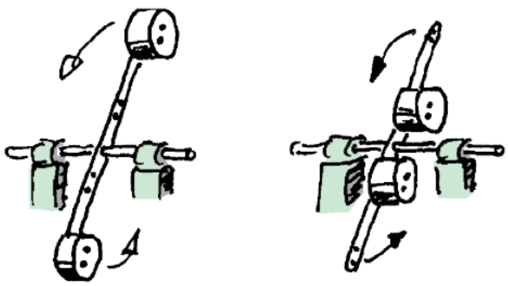


Abb. 8.15 Der Körper, bei dem die Masse weiter außen sitzt, hat mehr Drehimpuls.

Wir haben damit einen neuen Zusammenhang gefunden:

> Ein Körper enthält umso mehr Drehimpuls, je weiter außen seine Masse sitzt.

Damit haben wir eine Regel gefunden, die beim Bau von Schwungrädern beachtet werden muss: Die Masse muss möglichst weit außen sitzen. Ein Schwungrad mit großer Speicherfähigkeit sieht also so aus: ein großer, schwerer Ring, der mit dünnen Speichen an der Radnabe befestigt ist, Abb. 8.16.

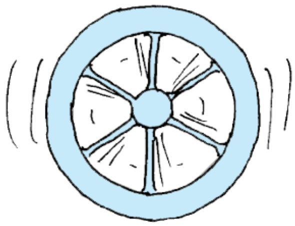


Abb. 8.16 Schwungrad. Die Speichen halten einen schweren Ring.

Aufgaben

1. Räder haben unterschiedliche Funktionen. Das Speichern von Drehimpuls ist nur eine davon. Wozu benutzt man Räder noch? Nenne mehrere unterschiedliche Verwendungszwecke.
2. Nenne Anwendungsbeispiele von Schwungrädern.
3. Man kann in einem Schwungrad nicht dadurch beliebig viel Drehimpuls speichern, dass man es immer schneller rotieren lässt. Warum nicht?

8.4 Drehimpulsleiter

Abb. 8.17 zeigt, wie ein Schwungrad mit Drehimpuls geladen wird. Der Drehimpuls wird vom Motor aus der Erde geholt. Er fließt dann über die Welle zum Schwungrad. Wellen dienen dem Drehimpulstransport, sie sind Drehimpulsleiter.

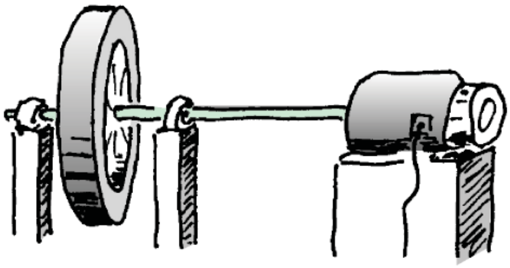


Abb. 8.17 Der Drehimpuls fließt über die Welle vom Motor zum Schwungrad.

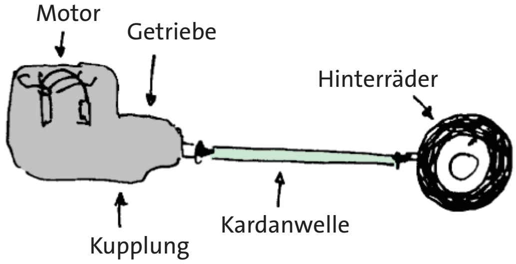


Abb. 8.19 Teil des Antriebs eines Autos

Welche Eigenschaft der Wellen ist dafür verantwortlich, dass sie den Drehimpuls leiten? Aus welchem Material müssen sie sein? Die einzige Bedingung ist, dass das Material fest ist. Jede beliebige feste Stange kann als Drehimpulsleiter verwendet werden.

> Feste Stoffe leiten den Drehimpuls.

Wir wollen uns noch ein paar andere Vorrichtungen ansehen, die mit dem Transport von Drehimpuls zu tun haben.

Ein Lager dient dazu, eine Welle festzuhalten, ohne dass dabei Drehimpuls in die Erde abfließt.

> Lager dienen der Drehimpulsisolation.

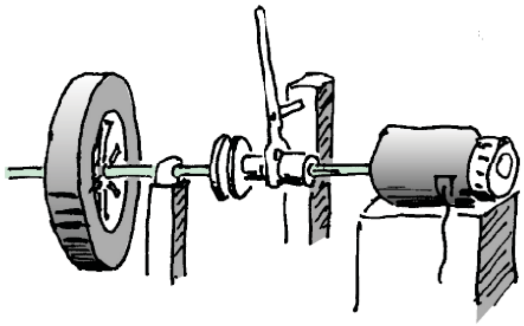


Abb. 8.18 Die Verbindung zwischen Motor und Schwungrad kann mit der Kupplung unterbrochen werden.

Abb. 8.18 zeigt eine Kupplung. Mit einem Hebel kann man die Verbindung zwischen Motor und Schwungrad unterbrechen und wiederherstellen.

> Mit einer Kupplung kann man eine Drehimpulsleitung unterbrechen.

Jedes Auto hat eine Kupplung. Sie befindet sich zwischen Motor und Getriebe, Abb. 8.19. Beim Treten des Kupplungspedals (ganz links im Auto) wird „ausgekuppelt“: Die Verbindung zwischen Motor und Getriebe wird unterbrochen.

Man muss auskuppeln, bevor man „schaltet“, d. h., die Zahnradübersetzung des Getriebes verändert. Wenn man während des Schaltens nicht auskuppelt, sondern den starken Drehimpulsstrom vom Motor zu den Rädern fließen lässt, wird das Getriebe beschädigt.

Wir lassen Drehimpuls durch eine Welle in ein Schwungrad fließen. Macht es für die Welle einen Unterschied, ob ein Drehimpulsstrom fließt oder nicht? Und macht es einen Unterschied, ob er von links nach rechts oder von rechts nach links fließt?

a)

b)

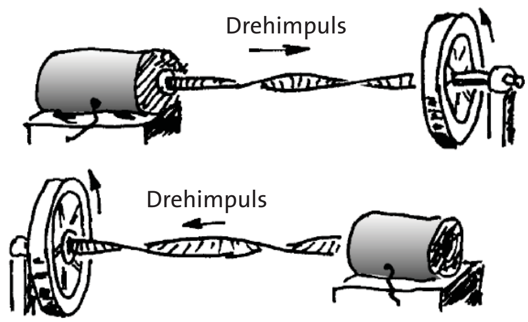


Abb. 8.20 (a) Der Drehimpuls fließt von links nach rechts. (b) Der Drehimpuls fließt von rechts nach links.

Man sieht es der Welle nicht an, wenigstens solange es eine dicke Welle ist. Verwenden wir deshalb als Welle einen biegsamen, elastischen Gegenstand, z. B. ein Plastiklineal, Abb. 8.20a. Wie reagiert das Lineal, wenn ein Drehimpulsstrom hindurchfließt? Es verdrillt sich, weil es auf eine bestimmte Art verspannt ist. Wir sagen, es steht unter Drillspannung. Auch ein fester Gegenstand, dem man keine Verdrillung ansieht, wenn ein Drehimpulsstrom durch ihn hindurchfließt, steht unter einer solchen Drillspannung.

Die Richtung der Verdrillung hängt nun davon ab, in welche Richtung der Drehimpuls fließt. In Abb. 8.20a wird das Rad mit positivem Drehimpuls geladen, d. h., im Lineal fließt der Drehimpuls von links nach rechts.

Auch in das Rad in Abb. 8.20b fließt positiver Drehimpuls hinein. Hier kommt er von rechts, er fließt also von rechts nach links. Worin unterscheiden sich die beiden Lineale?

Die Ränder beider Lineale bilden eine Schraubenlinie. Wie du vielleicht weißt, gibt es zwei Sorten von Schrauben: Rechts- und Linksschrauben, Abb. 8.21.

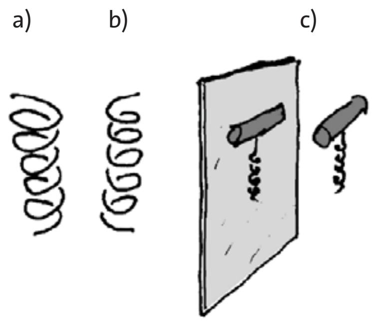


Abb. 8.21 (a) Rechtsschraube. (b) Linksschraube. (c) Korkenzieher und Spiegelbild

Eine Rechtsschraube ist die, die wie ein Korkenzieher aussieht oder wie ein gewöhnliches Gewinde. Eine Linksschraube bilden die sogenannten Linksgewinde, oder Korkenzieher, die man im Spiegel betrachtet.

Zurück zu unseren Drehimpulsströmen. In Abb. 8.20a fließt Drehimpuls von links nach rechts. Das Lineal ist wie ein Linksgewinde verdrillt. In Abb. 8.20b fließt Drehimpuls von rechts nach links. Das Lineal ist wie ein Rechtsgewinde verdrillt.

Drehimpulsstrom nach rechts: Verdrillung bildet Linksschraube; Drehimpulsstrom nach links: Verdrillung bildet Rechtsschraube.

Aufgaben

1. Entwirf ein Experiment, mit dem man untersuchen kann, ob Wasser den Drehimpuls leitet.
2. Entwirf ein Experiment, mit dem man nachweisen kann, dass Magnetfelder den Drehimpuls leiten.
3. Luft leitet den Drehimpuls fast nicht. Beschreibe ein Experiment oder nenne ein Gerät, an dem man sieht, dass die Luft den Drehimpuls doch etwas leitet.
4. Wellen sind Drehimpulsleiter. Im Auto befindet sich eine größere Anzahl verschiedener Wellen. Sie haben je nach Funktion unterschiedliche Namen. Nenne verschiedene Wellen im Auto. Wozu dienen sie?
5. Warum baut man manche Wellen dicker, andere dünner?

8.5 Drehimpulsstromkreise

Abb. 8.22 zeigt den Aufbau einer Kaffeemühle. Eine echte Kaffeemühle ist zwar etwas kompakter, aber im Wesentlichen ist sie so aufgebaut, wie es die Abbildung zeigt.

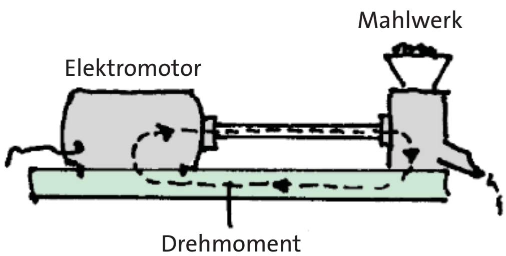


Abb. 8.22 Kaffeemühle. Der Drehimpuls fließt in einem geschlossenen Stromkreis.

Das Mahlwerk wird von einem Elektromotor angetrieben. Der Motor pumpt Drehimpuls über eine Welle zum Mahlwerk. Nimmt dadurch der Drehimpuls des Mahlwerks zu? Nein, denn dann müsste es sich immer schneller und schneller drehen, und das tut es nicht.

Wo bleibt also der Drehimpuls? Er muss aus dem Mahlwerk wieder abfließen. Das ist nicht verwunderlich. Schließlich gibt es zwischen dem rotierenden Innenteil des Mahlwerks und dem unbeweglichen äußeren Teil sehr starke Reibung, und Reibung ist wie ein sehr schlechtes Lager, d. h. ein Lager, über das der Drehimpuls leicht abfließt.

Wir haben also einen geschlossenen Drehimpulsstromkreis vor uns: Der Motor pumpt den

Drehimpuls aus dem Gehäuse der Maschine über die Welle zum Mahlwerk. Von dort gelangt er ins Gehäuse der Kaffeemühle. Über das Gehäuse fließt er zurück zum Motor.

Selbstverständlich müssen sowohl Motor als auch Mahlwerk gut am Gehäuse befestigt sein.

Ganz ähnlich ist die Situation bei Turbine und Generator in einem Kraftwerk, Abb. 8.23.

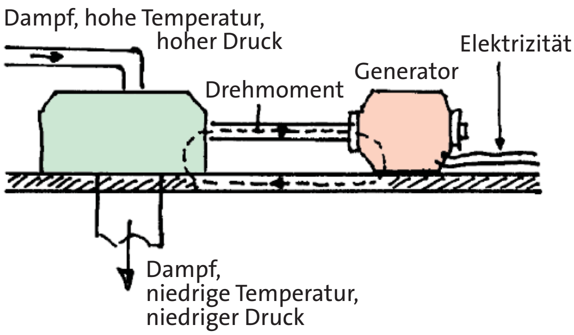


Abb. 8.23 Turbine und Generator in einem Kraftwerk. Der Drehimpuls fließt in einem geschlossenen Stromkreis.

a) b)

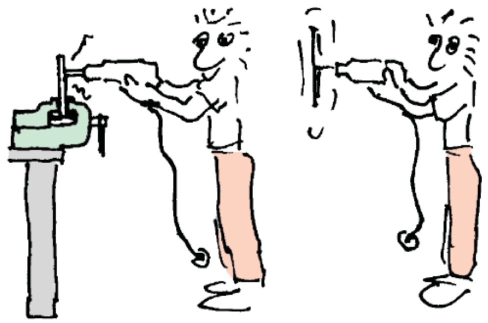


Abb. 8.24 (a) Der Drehimpulsstromkreis ist geschlossen. (b) Der Drehimpulsstromkreis ist unterbrochen.

Abb. 8.24a zeigt, wie Willy ein Loch in ein Brett bohrt. Der Drehimpuls fließt aus der Erde durch Willy über die Bohrmaschine ins Brett und dann über den Schraubstock zurück in die Erde.

Was passiert, wenn der Drehimpulsstromkreis nicht geschlossen ist, zeigt Abb. 8.24b. Das Brett wurde aus dem Schraubstock herausgenommen. Der Drehimpuls kann jetzt nicht mehr abfließen. Der Motor dreht durch, er pumpt gar nicht mehr. Das Brett dreht sich zwar, aber es wird nicht schneller, d. h., es kommt kein neuer Drehimpuls beim Brett an.

Aufgaben

1. Welchen Weg nimmt der Drehimpuls bei einem Ventilator?
2. Jemand spitzt einen Bleistift. Welchen Weg fließt der Drehimpuls?

8.6 Der Drehimpuls als Energieträger

Wir betrachten noch einmal die Kaffeemühle – aber unter einem neuen Gesichtspunkt: Wir machen eine Energiebilanz. Der Motor bekommt Energie, und er gibt sie an das Mahlwerk weiter. Welches sind die Energieträger? Zum Motor hin gelangt die Energie mit dem Energieträger Elektrizität.

Wie es weitergeht, müsste dir nun klar sein. Außer der Energie fließt zwischen Motor und Mahlwerk noch Drehimpuls. Der Drehimpuls muss also hier der Energieträger sein, Abb. 8.25.

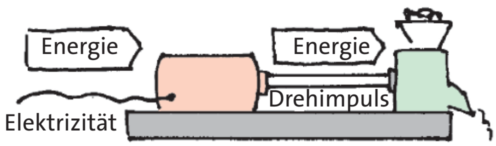


Abb. 8.25 Die Energie gelangt mit dem Energieträger Drehimpuls vom Motor zum Mahlwerk.

Der Drehimpuls ist ein Energieträger.

In anderen Worten: Im Elektromotor wird die Energie vom Träger Elektrizität auf den Träger Drehimpuls umgeladen. Mit dem Drehimpuls gelangt sie vom Motor zum Mahlwerk. Dort wird sie vom Drehimpuls abgeladen, und der Drehimpuls geht über das Gehäuse zurück zum Motor. Abb. 8.26 zeigt das Flussdiagramm eines Wasserkraftwerks.

Wir machen schließlich noch Drehimpuls- und Energiebilanz für ein Schwungrad. Das Schwungrad wird mit Drehimpuls geladen: Der Motor pumpt Drehimpuls aus der Erde über die Welle ins Schwungrad, Abb. 8.27.

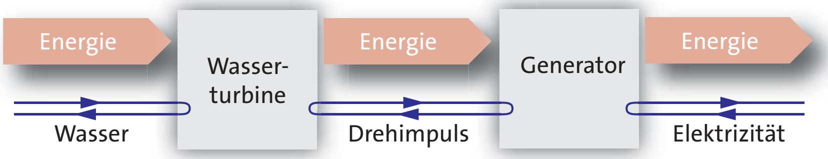


Abb. 8.26 Flussbild eines Wasserkraftwerks

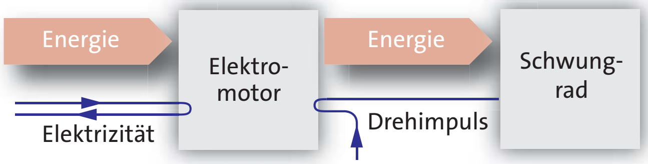


Abb. 8.27 Ein Schwungrad wird mit Drehimpuls und mit Energie geladen.

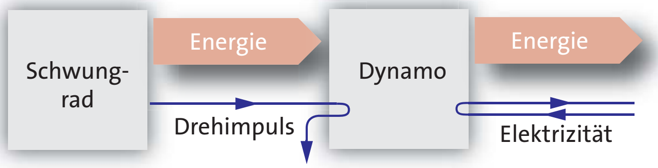


Abb. 8.28 Schwungrad, das einen Dynamo antreibt

Wir wissen inzwischen, dass durch die rotierende Welle nicht nur Drehimpuls, sondern auch Energie fließt. Wohin geht diese Energie? Da das Schwungrad keinen Ausgang für die Energie hat, muss sich die Energie im Schwungrad anhäufen. Das Schwungrad speichert also nicht nur Drehimpuls, sondern gleichzeitig Energie.

Mit einem sich drehenden Schwungrad, also einem Schwungrad, das man vorher mit Drehimpuls und Energie geladen hat, kann man etwas antreiben, z. B. einen Dynamo, Abb. 8.28.

Sicher kennst du Spielzeugautos mit Schwungradantrieb. Man muss ein solches Auto einmal schnell und kräftig über den Boden schieben. Dabei wird das Schwungrad des Autos mit Drehimpuls und Energie geladen. Mit der Energie des Schwungrads kann das Auto dann von selbst ein Stück fahren.

Aufgaben

1. Zeichne das Flussdiagramm einer Wasserturbine, eines Windrades, einer Wasserpumpe und eines Ventilatorrades.
2. Nenne Energiequellen, die die Energie mit dem Träger Drehimpuls abgeben. Woran erkennt man sie?
3. Nenne Energieempfänger, die Energie mit dem Träger Drehimpuls bekommen.
4. Woran erkennt man Geräte, die Energie vom Menschen mit dem Träger Drehimpuls bekommen?

9 DRUCK- UND ZUGSPANNUNGEN

9.1 Der Zusammenhang zwischen Druck und Impulsstromstärke

Ein Klotz K ist mit einer Feder F zwischen zwei Wänden eingespannt, Abb. 9.1. Durch die Anordnung fließt ein Impulsstrom. Das Fließen eines Impulsstroms ist stets damit verbunden, dass der Leiter des Stroms unter mechanischer Spannung steht: unter Druck- oder unter Zugspannung. Du erinnerst dich an unsere Regel: Impulsstrom nach rechts bedeutet Druck, Impulsstrom nach links Zug.

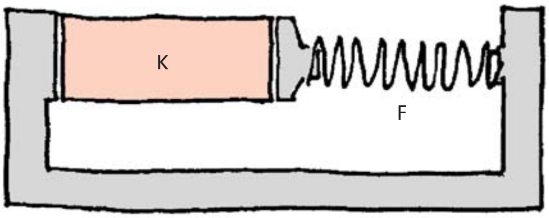


Abb. 9.1 Der Klotz K steht unter Druckspannung.

Wir wollen die Spannung des Klotzes betrachten. Da sich die Impulsströmung über den ganzen Klotz verteilt, steht jeder Teil des Klotzes unter Druckspannung; jeder Teil „spürt" den Druck, Abb. 9.2.

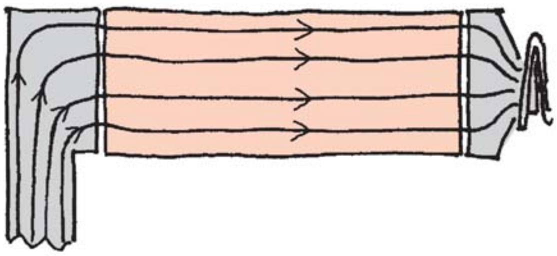


Abb. 9.2 Der Impulsstrom verteilt sich über die ganze Querschnittsfläche des Klotzes.

Wir vergleichen die beiden Klötze K_1 und K_2 in Abb. 9.3.

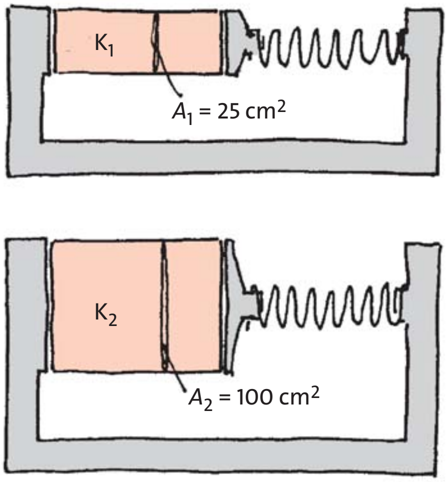


Abb. 9.3 Die Impulsströme in K_1 und K_2 sind gleich stark. Die Impulsstromstärke pro Fläche, d. h. der Druck, ist in K_1 größer als in K_2.

Da die beiden Federn völlig gleich sind, fließen in beiden Fällen gleich starke Impulsströme – nehmen wir an 200 Hy/s = 200 N. Klotz K_2 hat eine größere Querschnittsfläche als Klotz K_1. Daher verteilt sich der Impulsstrom hier auf eine größere Fläche. Die Impulsstromstärke pro Fläche ist also kleiner. Durch jeden Quadratzentimeter der Querschnittsfläche von Klotz K_1 fließen

$$\frac{200}{25}\frac{\text{Hy}}{\text{s}} = 8\ \text{N}.$$

Durch jeden Quadratzentimeter der Querschnittsfläche von Klotz K_2 fließen

$$\frac{200}{100}\frac{\text{Hy}}{\text{s}} = 2\ \text{N}.$$

Ein Stück Materie von K_1 „spürt" daher einen größeren Druck als ein gleich großes Stück Materie von K_2.

Wir sehen also: Um die mechanische Spannung an einer bestimmten Stelle irgendwo im Innern eines Körpers zu charakterisieren, kann man die Impulsstromstärke pro Fläche benutzen. Diese Größe, d.h. den Quotienten aus der Impulsstromstärke und der Fläche, durch die der Strom fließt, nennt man Druck. Es ist dieselbe physikalische Größe, die wir früher auf andere Art kennen gelernt hatten.

Da man den Druck mit dem Buchstaben p bezeichnet, ist

$$p = \frac{F}{A}.$$

Wenn man die Impulsstromstärke in Newton (N) einsetzt und die Fläche in m^2, so ergibt sich als Maßeinheit für den Druck N/m^2. Diese Maßeinheit nennt man Pascal, abgekürzt Pa. Es ist also

$$\mathrm{Pa} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}.$$

1 Pa ist ein sehr kleiner Druck. Man benutzt deshalb oft die größeren Einheiten

$$1\ \mathrm{kPa} = 1000\ \mathrm{Pa} \text{ und } 1\ \mathrm{MPa} = 1\,000\,000\ \mathrm{Pa}$$

oder auch das Bar: 1 bar = 100 000 Pa.

Noch einmal zurück zu unseren Klötzen. In Klotz K_1 herrscht ein Druck, oder eine Druckspannung, wie man auch sagt, von

$$p_1 = \frac{F}{A_1} = \frac{200\ \mathrm{N}}{0{,}0025\ \mathrm{m}^2} = 80000\ \mathrm{Pa} = 80\ \mathrm{kPa}.$$

Für Klotz K_2 ergibt sich

$$p_2 = \frac{F}{A_2} = \frac{200\ \mathrm{N}}{0{,}01\ \mathrm{m}^2} = 20000\ \mathrm{Pa} = 20\ \mathrm{kPa}.$$

(Die Flächeninhalte A_1 und A_2 müssen in m^2 ausgedrückt werden, damit sich als Druckeinheit Pa ergibt.)

Durch den Körper K in Abb. 9.4 fließt ein Impulsstrom von 200 N in die negative Richtung.

Bei der Berechnung der Größe p berücksichtigt man das, indem man ein Minuszeichen vor den Stromstärkewert setzt. Es ist

$$p = \frac{-200\ \mathrm{N}}{0{,}01\ \mathrm{m}^2} = -20000\ \mathrm{Pa} = -20\ \mathrm{kPa}.$$

Bei der Berechnung der Größe p berücksichtigt man das, indem man ein Minuszeichen vor den Stromstärkewert setzt. Es ist

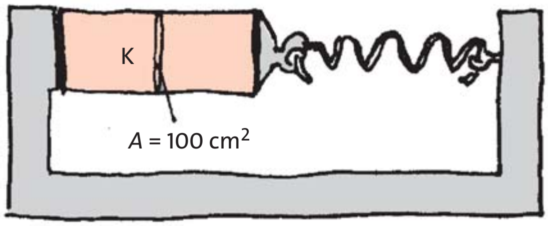


Abb. 9.4 Der Klotz steht unter Zugspannung, der Druck ist negativ.

Druck gleich Impulsstromstärke durch Fläche.

Aufgaben

1. Ein Auto wird abgeschleppt. Abb. 9.5 zeigt einen Ausschnitt: den Haken an dem Auto, das gezogen wird, ein Stück Drahtseil und, daran angeknotet, ein Kunststoffseil. In das Auto fließt dabei ein Impulsstrom von 420 N. Berechne die Spannung an den Stellen 1, 2 und 3. Achte auf das Vorzeichen: Druck- oder Zugspannung?
2. Die Seile in Abb. 9.6 haben einen Querschnitt von 1,5 cm^2. Die Kiste hat eine Masse von 12 kg. Berechne die Zugspannung an den drei Stellen 1, 2 und 3.
3. Du drückst eine Reißzwecke in ein Holzbrett. Schätze den Druck ab, der in der Mitte herrscht, auf halber Höhe des Nägelchens. Welcher Druck herrscht an der Spitze der Reißzwecke?
4. Schätze den Druck ab, der an der Spitze eines Nagels entsteht, wenn man mit einem Hammer auf den Nagel schlägt.

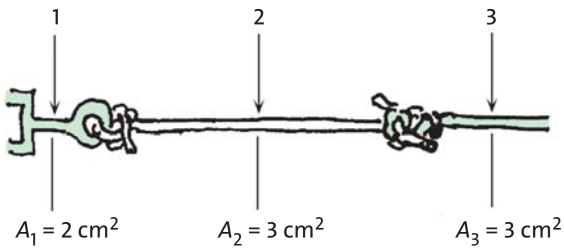


Abb. 9.5 Zu Aufgabe 1

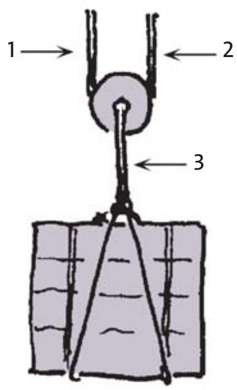


Abb. 9.6 Zu Aufgabe 2

9.2 Spannungen in drei Richtungen

Wir wollen einen Körper gleichzeitig unter Druck- und unter Zugspannung setzen. „Das geht doch gar nicht“, könnte man einwenden, „entweder er steht unter Druck oder unter Zug, das schließt sich doch gegenseitig aus!“ Wir kümmern uns nicht um den Einwand und versuchen es einfach — und haben Erfolg.

Wir nehmen den Gegenstand, einen Tafelschwamm zum Beispiel, umfassen ihn mit beiden Händen und drücken die Finger zusammen. Gleichzeitig ziehen wir die Hände auseinander, Abb. 9.7.

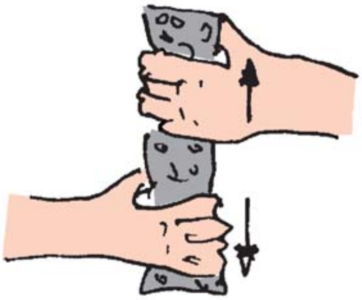


Abb. 9.7 Das Innere des Schwamms steht in senkrechter Richtung unter Zug-, in waagrechter unter Druckspannung.

Das Innere des Schwamms spürt nun tatsächlich gleichzeitig Druck und Zug: Druck in den waagrechten Richtungen und Zug in der senkrechten Richtung. Abb. 9.8 zeigt eine ähnliche Situation: Der Klotz K steht in der waagrechten Richtung unter Zug, in der senkrechten unter Druck. Man kann ihn natürlich auch in beiden Richtungen unter Zug oder in beiden Richtungen unter Druck setzen. Und die Druck- oder Zugspannungen in der waagrechten und senkrechten Richtung können verschiedene Werte haben.

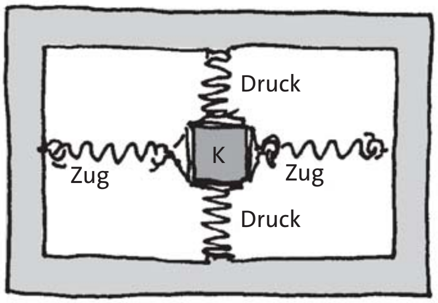


Abb. 9.8 Der Klotz steht in senkrechter Richtung unter Druck, in waagrechter unter Zug.

Im Fall der Abb. 9.9 hat der waagrechte Druck den Wert

$$p_1 = \frac{50\ \text{N}}{0{,}01\ \text{m}^2} = 5000\ \text{Pa} = 5\ \text{kPa}$$

und der senkrechte

$$p_2 = \frac{300\ \text{N}}{0{,}015\ \text{m}^2} = 20000\ \text{Pa} = 20\ \text{kPa}.$$

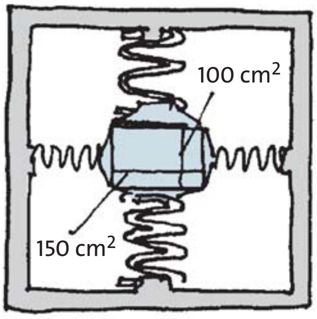


Abb. 9.9 Die Drücke in waagrechter und senkrechter Richtung sind verschieden.

Schließlich kann man den Klotz noch in der dritten Raumrichtung unter eine beliebige Druckspannung oder Zugspannung setzen, Abb. 9.10. Es kann zum Beispiel sein

$p_1 = 5\,000$ Pa,
$p_2 = -2\,000$ Pa,
$p_3 = -40\,000$ Pa.

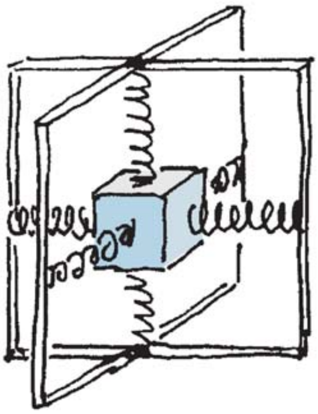


Abb. 9.10 Die Drücke können in drei aufeinander senkrechten Richtungen vorgegeben werden.

Du könntest auf die Idee kommen, dass man so weitermachen kann, dass man weitere verschiedene Druckwerte in weiteren Raumrichtungen erzeugen kann. Warum nicht fünf verschiedene Drücke (oder Zugspannungen) in fünf verschiedenen Richtungen, Abb. 9.11? Weil es nicht geht. Der Beweis dafür ist recht schwierig. Wir wollen deshalb das Ergebnis einfach hinnehmen:

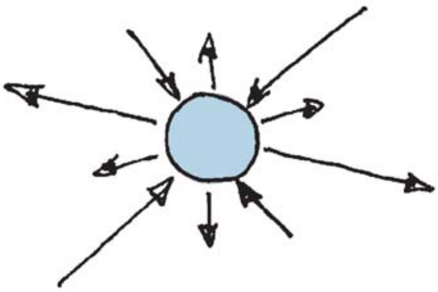


Abb. 9.11 Mehr als drei Drücke kann man in drei Dimensionen nicht vorgeben (in zwei Dimensionen nur zwei).

> Man kann Druck- oder Zugspannungen in drei aufeinander senkrechten Richtungen vorgeben.

Sobald man versucht, den Druck in einer vierten Richtung zu verändern, ändern sich automatisch auch die Drücke in den drei ersten Richtungen.

Dieses Ergebnis gilt für jeden Punkt innerhalb eines Körpers. Die mechanische Spannung kann sich aber durchaus von Ort zu Ort ändern. Bei dem zusammengedrückten Schwamm von Abb. 9.7 ist der Druck bzw. Zug in der Mitte sicher anders als am oberen und am unteren Ende.

Wenn der Druck in drei aufeinander senkrechten Richtungen denselben Wert hat, z. B. 12 kPa, so herrscht auch in allen anderen Raumrichtungen dieser Druck, nämlich 12 kPa.

Jedes Material hält nur bestimmte Druck- und Zugspannungen aus. Oft ist es so, dass ein Material für Druck viel höher beanspruchbar ist als für Zug.

Beton zum Beispiel verträgt Druckspannungen von ungefähr 50 MPa, aber Zugspannungen von nur 1/20 dieses Wertes. Manchmal soll aber ein Betonträger an bestimmten Stellen auf Zug belastet werden. Abb. 9.12 zeigt einen Betonträger, der außen aufliegt und in der Mitte eine Last

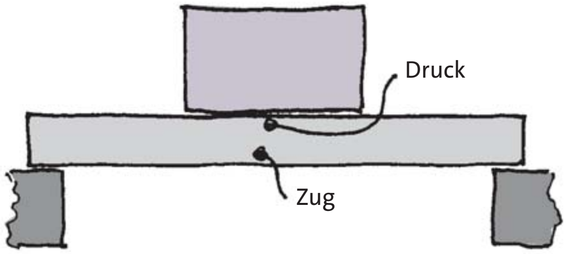


Abb. 9.12 Im oberen Teil des Trägers herrscht in waagrechter Richtung Druck, im unteren Zug.

trägt — eine typische Situation. Der Beton im oberen Bereich des Trägers steht in waagrechter Richtung unter Druck. Im unteren Bereich steht er in waagrechter Richtung unter Zug. Da der Beton selbst die Zugspannung nicht aushält, verstärkt man ihn in den Zugbereichen durch Stahl. Denn Stahl hält hohe Zugspannungen aus.

Aus demselben Grund, nämlich um die Zugfestigkeit des Materials zu erhöhen, werden manche Kunststoffe durch Kohlenstofffasern verstärkt. Man verwendet solche Materialien zum Beispiel zur Herstellung von Skiern, Sprungbrettern für Schwimmbäder und Segelflugzeugen.

Viele Materialien sind in den verschiedenen Richtungen nicht gleich stark belastbar. Ein bekanntes Beispiel ist das Holz. Nadelholz verträgt in Richtung der Maserung eine Zugspannung von etwa 10 MPa, quer dazu aber nur 1/20 davon.

Aufgaben

1. Nenne Materialien, die hohe Zugspannungen, aber nur geringe Druckspannungen vertragen.
2. Nenne Materialien, die hohe Druck-, aber nur geringe Zugspannungen vertragen.
3. Nenne Materialien, die in verschiedenen Richtungen verschiedene Druck- oder Zugspannungen vertragen.

9.3 Der Druck in Flüssigkeiten und Gasen

Wir haben bisher die mechanische Spannung in festen Gegenständen betrachtet. (Auch ein Schwamm ist ein „fester“ Gegenstand, denn er ist weder flüssig noch gasförmig.) Wir wollen nun eine Flüssigkeit, z. B. Wasser, unter Druck setzen.

Wir stellen uns zunächst absichtlich ungeschickt an und versuchen ähnlich vorzugehen, wie bei dem Klotz in Abb. 9.1: Wir drücken in der Mitte von oben auf das Wasser, Abb. 9.13. Es passiert, was passieren muss: Das Wasser weicht seitlich aus.

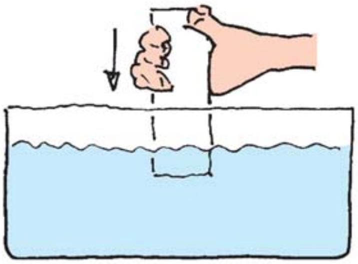


Abb. 9.13 So lässt sich das Wasser nicht unter Druck setzen. Es weicht seitlich aus.

Also gehen wir anders vor: Wir sperren das Wasser ein, sodass es nicht ausweichen kann, Abb. 9.14.

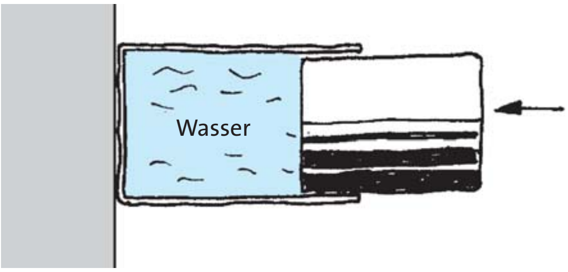


Abb. 9.14 Der Kolben steht nur in waagrechter Richtung unter Druck, das Wasser in allen Richtungen.

Wenn die Querschnittsfläche des Kolbens A = 5 cm^2 ist, und die Impulsstromstärke F = 200 N, so entsteht ein Druck in waagrechter Richtung von

$$p = \frac{F}{A} = \frac{200\ \text{N}}{0{,}0005\ \text{m}^2} = 400000\ \text{Pa} = 0{,}4\ \text{MPa}.$$

Da das Wasser in die Richtungen quer zur Druckrichtung des Kolbens auszuweichen versucht, entsteht aber auch in diesen Querrichtungen eine Druckspannung, die denselben Wert hat wie die in Kolbenrichtung. In allen anderen Richtungen herrscht ein Druck desselben Betrages.

Der in Abb. 9.15 dargestellte Versuch zeigt das besonders deutlich.

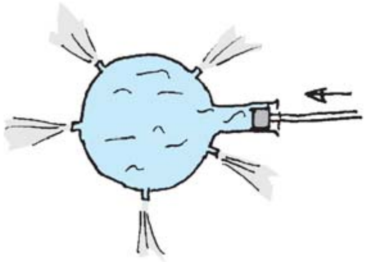


Abb. 9.15 Da in allen Richtungen Druck herrscht, spritzt das Wasser in alle Richtungen.

> An einer beliebigen Stelle einer Flüssigkeit herrscht in allen Richtungen derselbe Druck.

Das gilt auch für Gase, denn Gase weichen ebenfalls seitlich aus, wenn man sie nicht daran hindert.

9.4 Der Schweredruck

Wir erinnern uns: Der Druck an einer bestimmten Stelle in einer Flüssigkeit ist in allen Richtungen gleich. Das bedeutet aber nicht, dass der Druck an allen Stellen der Flüssigkeit derselbe sein muss. Wir lernen jetzt eine Situation kennen, in der sich der Druck von Ort zu Ort ändert.

Abb. 9.16 zeigt einen zylindrischen Behälter, der mit Wasser gefüllt ist. Im Wasser herrscht ein Druck, der von oben nach unten zunimmt. Wir wollen den Druck im Abstand h von der Wasseroberfläche berechnen.

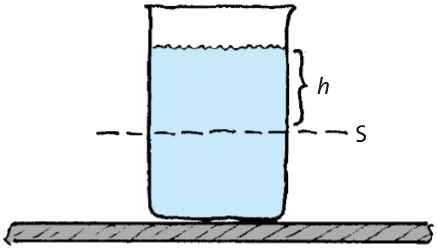


Abb. 9.16 Der Druck nimmt von oben nach unten zu.

Wir machen dazu in Gedanken einen Schnitt S durch die Wassersäule. Der Flächeninhalt der Schnittfläche ist A. Wir fragen zunächst nach der Stärke des Impulsstroms durch die Schnittfläche.

Dieser Impulsstrom kommt aus zwei verschiedenen Quellen:

1. Da der Druck der Luft oberhalb der Wasseroberfläche

$$p_{\text{Luft}} = 1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa},$$

beträgt, fließt von oben her ein Impulsstrom der Stärke

$$F_1 = p_{\text{Luft}} \cdot A$$

in das Wasser hinein und durch das Wasser hindurch.
2. Nach unserer alten Gleichung

$$F = m \cdot g \tag{9.1}$$

fließt in jeden Teil des Wassers ein Impulsstrom über das Schwerefeld hinein, der durch das Wasser nach unten hin abfließt (m = Masse, g = Ortsfaktor). Unsere Schnittfläche wird also vom ganzen Impulsstrom durchquert, der oberhalb davon in das Wasser hineinfließt. Um die Stärke dieses Impulsstroms zu berechnen, müssen wir in Gleichung (9.1) die Masse m_{oben} des Wassers oberhalb der Schnittfläche einsetzen:

$$F_2 = m_{\text{oben}} \cdot g \tag{9.2}$$

Die Masse m_{oben} können wir leicht berechnen. Wir lösen dazu die Beziehung

$$\rho = \frac{m}{V}$$

nach m auf, und setzen für ρ die Dichte des Wassers ein und für V das Volumen des Wassers oberhalb der Schnittfläche:

$$m_{\text{oben}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot V_{\text{oben}}.$$

Nun ist

$$V_{\text{oben}} = A \cdot h,$$

also wird

$$m_{\text{oben}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot A \cdot h.$$

Dies in Gleichung (9.2) eingesetzt, ergibt

$$F_2 = m_{\text{oben}} \cdot g = \rho_{\text{Wasser}} \cdot A \cdot h \cdot g.$$

Die Gesamtimpulsstromstärke F setzt sich aus F_1 und F_2 zusammen:

$$\begin{aligned} F = F_1 + F_2 &= p_{\text{Luft}} \cdot A + \rho_{\text{Wasser}} \cdot A \cdot h \cdot g \\ &= (p_{\text{Luft}} + \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h) \cdot A\,. \end{aligned}$$

Mit $p = F/A$ können wir nun auch den Druck in der Höhe der Schnittfläche berechnen:

$$\begin{aligned} p &= \frac{F}{A} = \frac{(p_{\text{Luft}} + \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h)A}{A} \\ &= p_{\text{Luft}} + \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

Der Druck im Abstand h von der Wasseroberfläche ist also:

$$p = p_{\text{Luft}} + \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h \tag{9.3}$$

Da der Impulsstrom aus zwei Teilen besteht, setzt sich der Druck ebenfalls aus zwei Anteilen zusammen:

- aus dem Beitrag p_{Luft}, der Luft oberhalb des Wassers, und
- aus dem Beitrag $p_S = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h$, der seine Ursache im Gewicht des Wassers hat. Das tiefer liegende Wasser spürt das Gewicht des darüber liegenden Wassers. Man nennt diesen Anteil p_S den Schweredruck des Wassers.

Eigentlich handelt es sich bei dem berechneten Druck nur um einen Druck in senkrechter Richtung. Da wir aber eine Flüssigkeit betrachtet haben, muss derselbe Druck in den waagrechten Richtungen herrschen.

Natürlich gelten unsere Überlegungen auch für andere Flüssigkeiten als Wasser. Man muss nur statt der Dichte ρ_{Wasser} die Dichte der betrachteten Flüssigkeit einsetzen. Es gilt also allgemein:

> Der Schweredruck in einer Flüssigkeit ist:
> $p_S = \rho \cdot g \cdot h$

Wir wollen den Schweredruck in Wasser konkret mit Zahlen berechnen. Wir setzen

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ und } g = 10 \text{ N/kg}$$

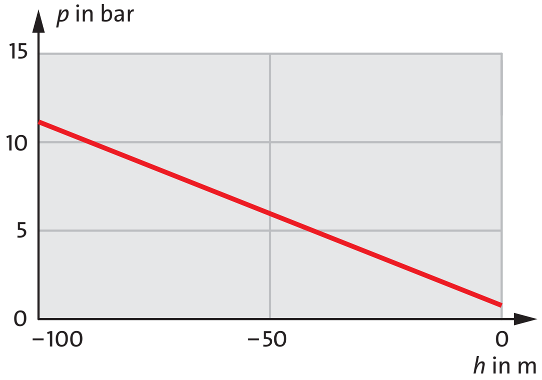


Abb. 9.17 Druck als Funktion der Höhe in Wasser. Der Nullpunkt der Höhe liegt an der Wasseroberfläche.

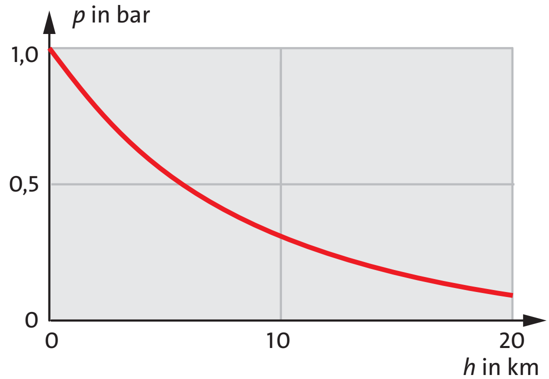


Abb. 9.18 Luftdruck als Funktion der Höhe. Hier wird die Höhe nach oben hin positiv gezählt.

und erhalten

$$p_S = 1000\ \text{kg/m}^3 \cdot 10\ \text{N/kg} \cdot h = 10\,000 \cdot h \cdot \text{N/m}^3.$$

Beträgt der Abstand zur Wasseroberfläche h = 10 m, so wird

$$p_S = 100\,000\ \text{N/m}^3 = 100\,000\ \text{Pa} = 1\ \text{bar}.$$

Der Gesamtdruck ist $p = p_{\text{Luft}} + p_S = 1$ bar + 1 bar = 2 bar. In 10 m Wassertiefe ist also der Druck um 1 bar höher als an der Wasseroberfläche, in 20 m Tiefe um 2 bar etc.

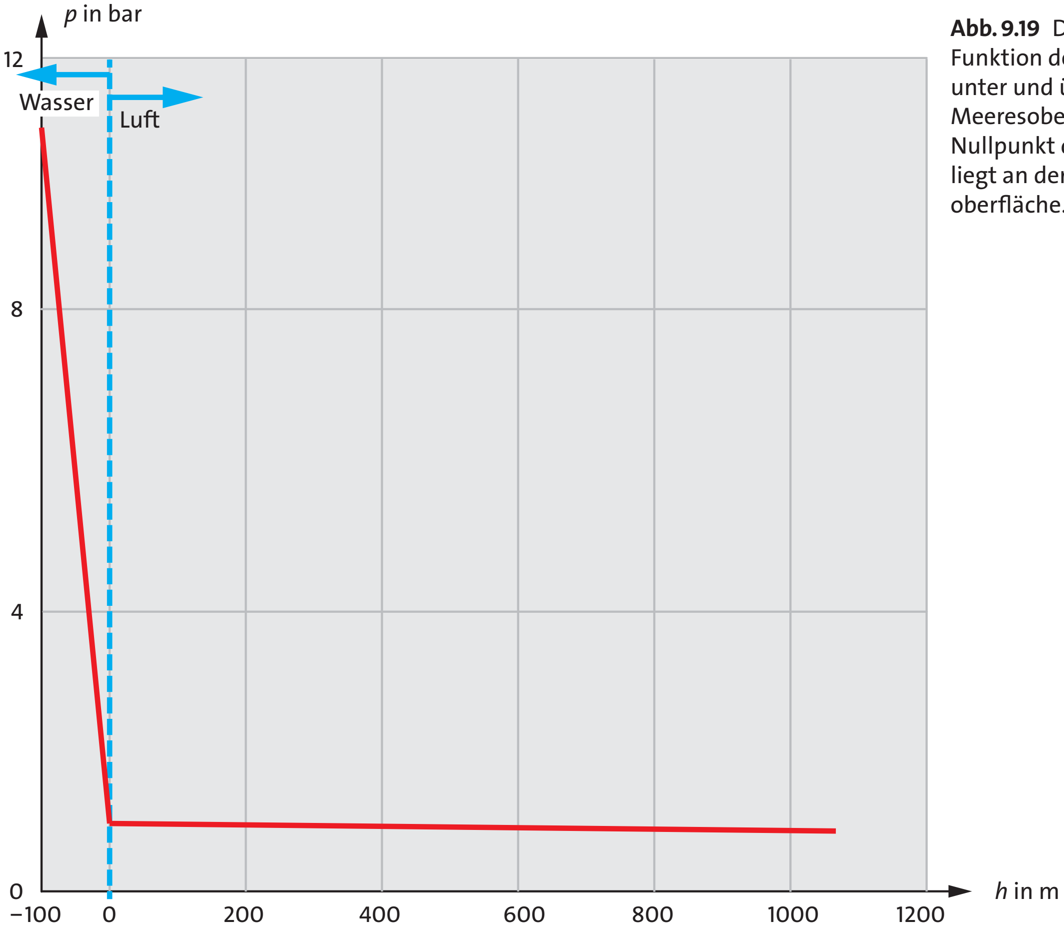


Abb. 9.19 Druck als Funktion der Höhe unter und über der Meeresoberfläche. Der Nullpunkt der Höhe liegt an der Meeresoberfläche.

Abb. 9.17 zeigt den Druck als Funktion der Höhe h. Der Nullpunkt von h liegt an der Wasseroberfläche.

Genauso wie der Druck in Wasser nach oben hin abnimmt, so nimmt auch der Druck der Luft über der Erdoberfläche nach oben hin ab. Der Druck der uns umgebenden Luft ist der Schweredruck der Luft. Allerdings ist hier die Druckabnahme mit der Höhe nicht linear. Wir können zur Berechnung des Luftdrucks als Funktion der Höhe die Formel $p_S = \rho \cdot g \cdot h$ nicht mehr benutzen, da die Dichte der Luft mit der Höhe abnimmt. Abb. 9.18 zeigt den (Schwere-) Druck der Luft als Funktion der Höhe. Beachte, dass die Höhenskalen der Abb. 9.17 und Abb. 9.18 verschieden sind.

Abb. 9.19 zeigt den Druck als Funktion der Höhe unter- und oberhalb der Meeresoberfläche. Die Höhenskala beginnt 100 m unter der Wasseroberfläche. Der Druck beträgt hier 11 bar. Wenn man zur Wasseroberfläche aufsteigt, sinkt der Druck bis auf 1 bar. Dies ist der Schweredruck der Luft in Meeresspiegelhöhe. Geht man weiter nach oben, so nimmt der Druck weiter ab. Da die Dichte der Luft sehr gering ist, ist auch diese Abnahme sehr gering.

Aufgaben

1. Wie groß ist der Schweredruck des Wassers am Boden eines 4 m tiefen Schwimmbeckens? Wie groß ist der Gesamtdruck?
2. Das Meer ist an der tiefsten Stelle etwa 11 000 m tief. Wie hoch ist hier der Druck?
3. Wie hoch ist der Druck am Boden des Gefäßes in Abb. 9.20? Der Kolben, der die beiden Flüssigkeiten trennt, ist leicht verschiebbar. Er ist so klein und so leicht, dass man seinen Einfluss auf den Druck am Boden nicht zu berücksichtigen braucht. Die Dichte von Quecksilber beträgt 13 550 kg/m³.

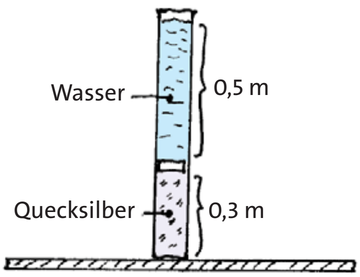


Abb. 9.20 Zu Aufgabe 3

9.5 Kompliziertere Behälter

Zum Auffinden der Formel

$$p_S = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h$$

haben wir einen Behälter mit senkrechten Wänden betrachtet. Es ist naheliegend zu denken, dass unsere Formel nur für solche Behälter gilt.

Abb. 9.21a zeigt einen Behälter, der aus zwei Teilen besteht. Die Teile sind durch ein Rohr miteinander verbunden. Wie hoch ist der Schweredruck an der Stelle A, und wie hoch ist er an der Stelle B? Wir wenden unsere Formel an und finden

- bei A: $p_{S,A} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h_A$,
- bei B: $p_{S,B}' = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h_B'$.

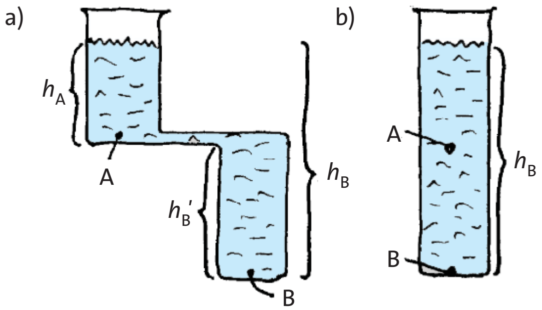


Abb. 9.21 Der Druck bei B im Behälter im linken Bild ist derselbe wie bei B im rechten Bild.

Die berechneten Drücke sind richtig — man muss nur wissen, was man berechnet hat. Wir sehen zunächst davon ab, dass die Luft mit 1 bar auf die Wasseroberfläche drückt.

$p_{S,A}$ ist der Schweredruck, den das Wasser im oberen Behälter an der Stelle A verursacht. Und $p_{S,B}'$ ist der Schweredruck, den das Wasser des unteren Behälters an der Stelle B zur Folge hat. Wir müssen nun berücksichtigen, dass das Wasser des oberen Behälters über die dünne Verbindungsleitung auf das Wasser im unteren Behälter drückt. Zum Druck in B trägt demnach nicht nur das Wasser im unteren Behälter bei, sondern über die Verbindungsleitung auch das Wasser im oberen Behälter.

Wir können also gleich sagen: An der Stelle B ist der Schweredruck des gesamten Wassers

$$p_{S,B} = p_{S,A} + p_{S,B}' = \rho_{Wasser} \cdot g \cdot (h_A + h_B') = \rho_{Wasser} \cdot g \cdot h_B.$$

Der Druck bei B ist derselbe wie wenn wir einen durchgehenden Behälter der Höhe h_B hätten, Abb. 9.21b. In anderen Worten: Die Höhe h, die wir in Gleichung

$$p_S = \rho_{Wasser} \cdot g \cdot h$$

einsetzen müssen, ist der senkrechte Abstand zur Ebene der Wasseroberfläche – egal, ob die Wasseroberfläche über dem betrachteten Punkt liegt oder ob sie dagegen versetzt ist. Und egal wie groß die Oberfläche ist.

An jedem Punkt im Wasser in einer bestimmten Tiefe unter der Wasseroberfläche herrscht also derselbe Druck. Dies ist in Abb. 9.22 noch einmal anschaulich dargestellt.

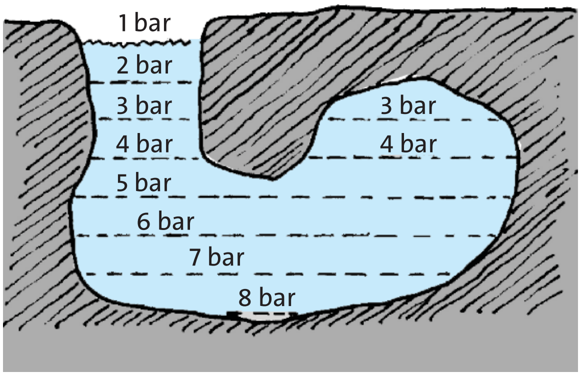


Abb. 9.22 In einer zusammenhängenden Flüssigkeitsmenge ist der Druck in einer waagrechten Ebene überall gleich.

Dass der Druck in einer bestimmten Tiefe überall derselbe ist, gilt übrigens nur, solange die Flüssigkeit nicht strömt. Falls die Flüssigkeit (oder das Gas) nicht ruht, falls man also eine Strömung hat, ist der Druck nicht mehr konstant, denn eine Strömung kommt ja gerade dadurch zustande, dass ein Druckunterschied besteht.

Wir fassen zusammen:

In ruhenden Flüssigkeiten und Gasen ist der Druck in einer waagrechten Ebene überall gleich groß.

Dieser Satz ist in Übereinstimmung mit einer Erfahrung, die jeder schon gemacht hat: In verbundenen Gefäßen sind die Wasseroberflächen gleich hoch, Abb. 9.23.

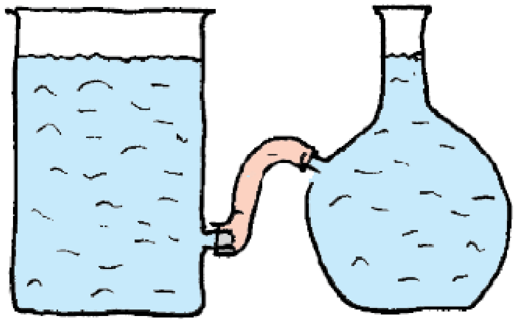


Abb. 9.23 In verbundenen Gefäßen liegen die Flüssigkeitsoberflächen gleich hoch.

Aufgaben

1. Was passiert, wenn der Hahn in Abb. 9.24 geöffnet wird? Warum?
2. Im linken Behälter von Abb. 9.25 befindet sich Wasser, im rechten Alkohol. Die Grenze zwischen den beiden Stoffen liegt in dem waagrechten Rohr. Der Flüssigkeitsspiegel im rechten Behälter liegt höher als der im linken. Warum? Wie groß ist der Höhenunterschied? ($\rho_{Alkohol} = 790\ \mathrm{kg/m^3}$)

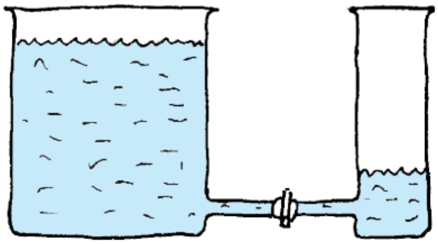


Abb. 9.24 Zu Aufgabe 1

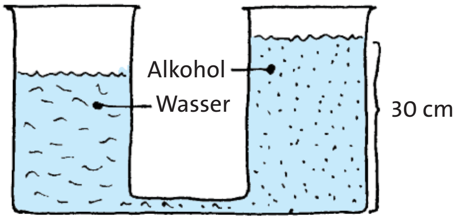


Abb. 9.25 Zu Aufgabe 2

9.6 Der Auftrieb

Ein Ball wird unter die Wasseroberfläche gedrückt. Man spürt: Der Ball „möchte“ nach oben. Wie kommt das? Das Wasser drückt von allen Seiten auf die Oberfläche des Balls. Da der Druck im Wasser nach unten hin zunimmt, drückt das Wasser an der Unterseite stärker als an der Oberseite. Die Folge: Der Ball wird nach oben gedrückt, Abb. 9.26.

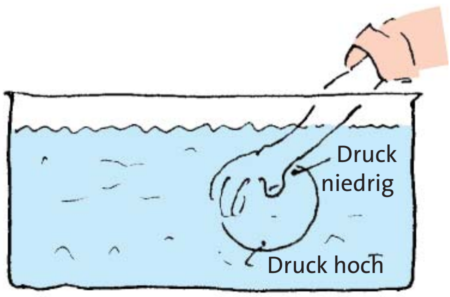


Abb. 9.26 An der Unterseite des Balls ist der Druck höher als an der Oberseite.

Nicht nur ein sehr leichter Gegenstand wie ein Ball wird nach oben gedrückt, sondern auch jeder andere Körper, der in eine Flüssigkeit getaucht wird.

Ein Stück Eisen wird an eine Waage gehängt und dann in Wasser eingetaucht, Abb. 9.27. Der Ausschlag der Waage geht zurück. Das Wasser drückt das Eisenstück nach oben, das Eisenstück wird scheinbar leichter.

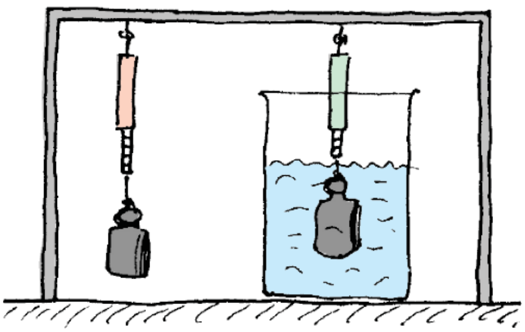


Abb. 9.27 Ein Stück Eisen, das an einer Waage hängt, wird in Wasser getaucht. Es wird scheinbar leichter.

In den Eisenkörper fließt über das Schwerefeld der Erde ein Impulsstrom der Stärke

$$F = m_{\text{Eisen}} \cdot g$$

hinein. Dieser ankommende Impulsstrom fließt in Abb. 9.27a durch die Schnur wieder ab. In Abb. 9.27b fließt nur ein Teil davon über die Schnur weg. Der Rest fließt über das Wasser ab. Die Stärke des über das Wasser fließenden Impulsstroms nennt man den Auftrieb. Wir wollen ihn berechnen.

Wir betrachten dazu zunächst das Wasser ohne eingetauchten Körper, grenzen aber in Gedanken denjenigen Bereich des Wassers ab, den der eingetauchte Körper einnehmen wird. (Du kannst dir auch vorstellen, dieses Wasser sei durch einen sehr leichten Plastikbeutel vom äußeren Wasser getrennt.) Dieser „Wasserkörper“ bleibt in der Schwebe, er steigt nicht nach oben und sinkt nicht ab. Das bedeutet aber, dass er keinen Nettoimpuls bekommt oder verliert.

Der ganze zufließende Impulsstrom, den der Körper über das Schwerefeld bekommt,

$$F_{\text{hin}} = m_{\text{Wasser}} \cdot g,$$

fließt über seine Oberfläche wieder ab, in das umgebende Wasser, und von dort weiter zur Erde. Wir wissen damit, dass auch der wegfließende Impulsstrom F_{weg} die Stärke

$$F_{\text{weg}} = m_{\text{Wasser}} \cdot g$$

haben muss.

Wir ersetzen nun unseren Phantomkörper aus Wasser durch den ursprünglichen Eisenkörper. In den Eisenkörper hinein fließt ein Impulsstrom der Stärke

$$F_{\text{hin}} = m_{\text{Eisen}} \cdot g$$

Von ihm weg fließt aber noch derselbe Strom wie vorher, denn die Druckverteilung an der Oberfläche des Eisenkörpers ist dieselbe wie die an der Oberfläche des Wasserkörpers. Es fließt also ein Strom der Stärke

$$F_{\text{weg}} = m_{\text{Wasser}} \cdot g$$

weg.

Der Nettostrom ist diesmal nicht null, sondern

$$F_{\text{Netto}} = F_{\text{hin}} - F_{\text{weg}} = (m_{\text{Eisen}} - m_{\text{Wasser}}) \cdot g \tag{9.4}$$

Den Betrag $m_{\text{Wasser}} \cdot g$, um den der Impulsstrom durch das Eintauchen kleiner geworden ist, ist der gesuchte Auftrieb F_A:

$$F_A = m_{\text{Wasser}} \cdot g\,.$$

Wir erinnern uns, was m_{Wasser} bedeutet: Es ist die Masse unseres Wasserkörpers, d. h. die Masse des von unserem richtigen Körper verdrängten Wassers.

Unsere Überlegungen gelten natürlich auch dann, wenn der eingetauchte Körper nicht aus Eisen und die Flüssigkeit kein Wasser ist. In Gleichung (9.4) setzen wir für die Masse des Körpers m_K statt m_{Eisen} und für die Masse der Flüssigkeit m_{Fl} statt m_{Wasser} und erhalten:

$$F_{\text{Netto}} = (m_K - m_{\text{Fl}}) \cdot g. \tag{9.5}$$

Der Auftrieb ist der Teil, der von $m_K \cdot g$ abgezogen wird, also:

$$F_A = m_{\text{Fl}} \cdot g\,.$$

Wir können das so ausdrücken:

> Die scheinbare Masse ist um die Masse der verdrängten Flüssigkeit kleiner als die tatsächliche Masse.

Wir wollen nun Gleichung (9.5) in eine bequemere Form bringen. Wir ersetzen die beiden Massen m_K und m_{Fl} mithilfe der Gleichung

$$m = \rho \cdot V,$$

die aus

$$\rho = m/V$$

folgt. Es wird also

$$m_K = \rho_K \cdot V, \tag{9.6}$$

und

$$m_{\text{Fl}} = \rho_{\text{Fl}} \cdot V\,. \tag{9.7}$$

Das Volumen V des Körpers ist dasselbe wie das der verdrängten Flüssigkeit.

Gleichung (9.6) und (9.7) in (9.5) eingesetzt ergibt:

$$F_{\text{Netto}} = (\rho_K - \rho_{\text{Fl}}) V \cdot g\,.$$

Diese Gleichung sagt uns, dass die Nettoimpulsstromstärke positiv ist, wenn ρ_K größer als ρ_{Fl} ist und negativ, wenn ρ_K kleiner als ρ_{Fl} ist. Eine positive Nettoimpulsstromstärke bedeutet, dass sich der Körper nach unten in Bewegung setzt: Er sinkt. Eine negative Nettoimpulsstromstärke bedeutet, dass sich der Körper in die negative Richtung, d. h. nach oben in Bewegung setzt: Er steigt auf, er schwimmt. Nur wenn $\rho_K = \rho_{\text{Fl}}$ ist, ist auch $F_{\text{Netto}} = 0$, und der Körper bleibt in der Schwebe.

> $\rho_K > \rho_{\text{Fl}}$: Der Körper sinkt.
> $\rho_K < \rho_{\text{Fl}}$: Der Körper schwimmt.
> $\rho_K = \rho_{\text{Fl}}$: Der Körper schwebt.

Aufgaben

1. Berechne den Auftrieb F_A eines Eisenstücks mit einem Volumen von 5 cm^3, das vollständig in Quecksilber eingetaucht wird. Schwimmt es, wenn man es loslässt, oder sinkt es? Um wie viel Gramm scheint die Masse des Eisenstücks verkleinert zu sein? (Dichte von Eisen: 7900 kg/m^3, Dichte von Quecksilber: 13 550 kg/m^3)
2. Ein Granitfelsbrocken mit einer Masse von 150 Tonnen liegt am Meeresboden (Dichte von Granit: 2600 kg/m^3). Wie groß ist der Auftrieb? Um wie viel scheint seine Masse kleiner zu sein, als wenn er sich auf dem Land befände?
3. Ein Stein mit einer Dichte von 2400 kg/m^3 liegt auf dem Boden eines Schwimmbeckens. Er „wiegt" im Wasser 1,4 kg. Welche Masse hat er wirklich?
4. Die Dichte von Holz ist kleiner als die von Wasser. Daher steigt ein Stück Holz, das man unter die Wasseroberfläche taucht, nach oben. Wenn ein Teil des Holzstücks aus dem Wasser herausragt, steigt es nicht weiter. Warum nicht?
5. Ein Schiff wiegt 1500 t. Welche Masse hat das verdrängte Wasser?
6. Ein Schiff fährt zunächst in einem Fluss, dann im Meer. Die Dichte des Meerwassers ist etwas größer als die des Flusswassers. Welche Folge hat das für das Schiff?

9.7 Zugspannung in Gasen und Flüssigkeiten

Wenn man mit einem Trinkhalm eine Cola trinkt, hat man das Gefühl, an der Cola zu ziehen, Abb. 9.28. Warum sollte sie sonst in dem Röhrchen nach oben steigen? Wenn man anfängt zu trinken, ist noch Luft im Trinkhalm. Man saugt, und die Cola steigt nach oben. Es sieht so aus, als könne man an der Luft ziehen.

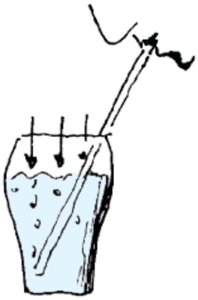


Abb. 9.28 Die Cola wird im Trinkhalm nach oben gedrückt, nicht gezogen.

Wir werden sehen, dass dieser Schluss falsch ist. Weder an der Luft noch an der Cola kann man ziehen, oder allgemeiner:

> Gase und Flüssigkeiten lassen sich nicht unter Zugspannung setzen.

Aber wo liegt der Fehlschluss? Wie kommt die Cola in den Mund, wenn nicht durch Ziehen?

In dem Zylinder in Abb. 9.29a befindet sich Luft unter Normaldruck: $p = 1$ bar. Außerhalb befindet sich jedoch auch Luft mit einem Druck von 1 bar. Obwohl die Luft von innen gegen den Kolben drückt, brauchen wir den Kolben nicht festzuhalten: Die Außenluft drückt genauso stark und hält dem Innendruck das Gleichgewicht.

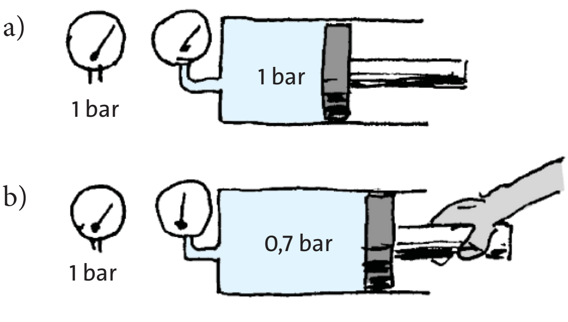


Abb. 9.29 Auf den Kolben drückt Luft von innen und von außen. (a) Der Druck ist innen und außen gleich. (b) Der Druck ist außen höher als innen.

Wir ziehen nun den Kolben ein Stück nach rechts und halten ihn fest, Abb. 9.29b. Der Druck der Luft im Innern nimmt dabei ab, der Druck der Außenluft natürlich nicht. Wir haben jetzt den Eindruck, irgend jemand ziehe den Kolben nach links, wir müssen ihn festhalten. Tatsächlich wird er einfach von der Außenluft nach links gedrückt. Im Innern ist der Druck nach wie vor positiv, nur ist er kleiner als vorher. Jedoch herrscht keine Zugspannung.

Man könnte denken, dass man vielleicht doch eine Zugspannung im Innern erzeugen kann, wenn man nur genügend weit zieht, wenn man den Kolben genügend weit nach rechts bewegt, Abb. 9.30. Der Versuch zeigt, dass es nicht geht. Der Druck nimmt zwar weiter ab, aber immer weniger schnell. Er erreicht nie den Wert 0 bar. Er bleibt immer positiv.

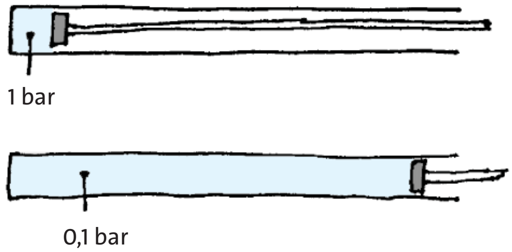


Abb. 9.30 So weit man den Kolben auch herauszieht – der Druck im Zylinder bleibt positiv.

Statt einen Kolben herauszuziehen, kann man den Zylinder einfach an eine Vakuumpumpe anschließen, Abb. 9.31. Während die Pumpe läuft, nimmt der Druck ab, und erst wenn alle Luft heraus ist, erreicht der Druck den Wert 0 bar. Einen negativen Druck erhält man auch bei längerem Pumpen nicht. Kein Wunder: Wenn die Luft her-

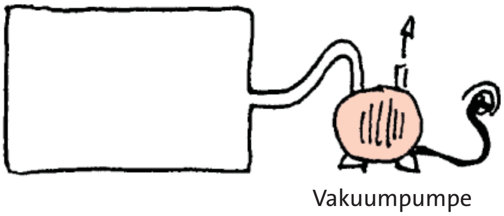


Abb. 9.31 Auch mit einer Vakuumpumpe erreicht man keinen negativen Druck.

aus ist, ist ja nichts mehr da, das unter Zug stehen könnte.

Etwas anderes passiert, wenn man versucht, an einer Flüssigkeit zu ziehen, an Wasser zum Beispiel, Abb. 9.32. Der Kolben lässt sich nicht so leicht nach außen ziehen, wie bei dem Gas. Der Grund dafür ist aber auch hier nicht eine Zugspannung im Innern, sondern wieder der Druck der Außenluft auf den Kolben.

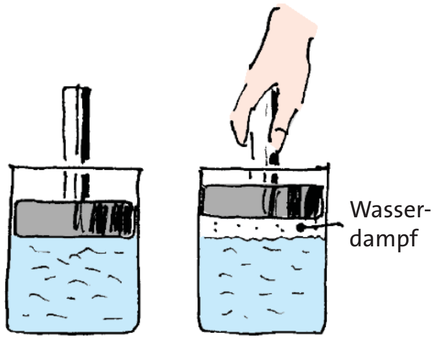


Abb. 9.32 In dem Zylinder befindet sich Wasser. Wenn man am Kolben zieht, bildet sich eine Blase mit Wasserdampf.

Wenn man nun genügend stark zieht und den Außendruck überwindet, bewegt sich der Kolben schließlich doch. Man sieht jetzt aber, dass sich die Flüssigkeit dabei nicht ausdehnt wie die Luft in Abb. 9.29. Vielmehr bildet sich eine Blase, ein Raumgebiet, in dem sich kein flüssiges Wasser befindet. Um eine Luftblase kann es sich dabei nicht handeln. Woher sollte die Luft denn kommen? Tatsächlich ist dieser Raum fast leer. Eine genaue Untersuchung zeigt, dass er nicht ganz leer ist: Es befindet sich eine sehr geringe Menge Wasserdampf, d. h. gasförmiges Wasser, in ihm.

Nun zurück zu unserer Cola. Wenn man mit einem Trinkhalm saugt, entfernt man Luft aus dem Halm. Daher nimmt der Druck der Luft im Halm ab. Da die Außenluft auf die Cola drückt, steigt die Cola im Trinkhalm nach oben. Die Cola wird also nicht nach oben gezogen, sondern gedrückt.

Ganz Ähnliches gilt für eine Saugpumpe, Abb. 9.33. Die Pumpe scheint das Wasser nach oben zu ziehen. Tatsächlich vermindert sie oben nur den Druck, sodass die Außenluft das Wasser nach oben drücken kann.

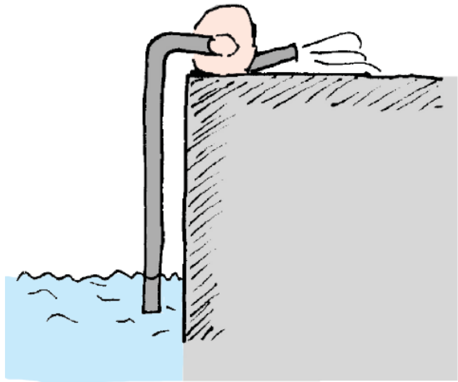


Abb. 9.33 Die Pumpe vermindert an ihrem Eingang den (positiven) Druck. Das Wasser wird von der Luft über der Wasseroberfläche durch die Leitung nach oben gedrückt.

Aufgaben

1. Ein Glas wird, mit der Öffnung nach unten, unter Wasser gedrückt. Warum füllt es sich nicht mit Wasser?
2. Ein Glas wird unter Wasser gehalten, sodass es sich mit Wasser füllt, und dann mit der Öffnung nach unten aus dem Wasser herausgezogen, Abb. 9.34. Warum bleibt das Wasser im Glas?
3. Wie hoch ist der Druck des Wassers an der Stelle A in Abb. 9.35? Wie hoch ist der Druck an der Stelle B? Was passiert, wenn der Hahn geöffnet wird?

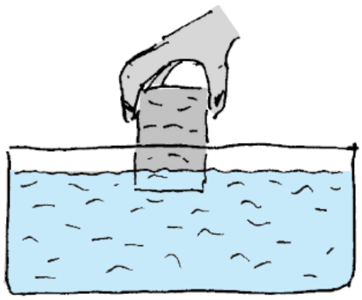


Abb. 9.34 Zu Aufgabe 2

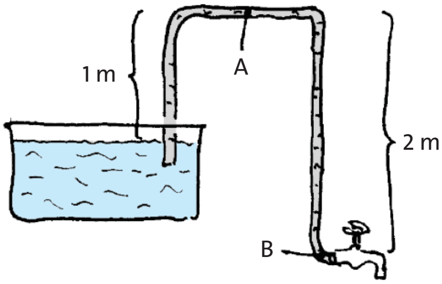


Abb. 9.35 Zu Aufgabe 3

9.8 Hydraulischer Energietransport

Wir sind nun in der Lage zu verstehen, warum hydraulische Maschinen so praktisch sind.

Wir untersuchen als Erstes die einfachste hydraulische Energieübertragung, die man sich denken kann, Abb. 9.36: ein Rohr mit einem Kolben an jedem Ende und mit einer Flüssigkeit zwischen den Kolben. Als Flüssigkeit kannst du dir Wasser vorstellen. Tatsächlich benutzt man gewöhnlich ein Öl. Der Vorteil des Öls liegt auf der Hand: Es gefriert bei viel tieferen Temperaturen als Wasser. Außerdem werden die Kolben gleich geschmiert.

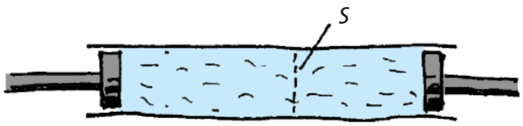


Abb. 9.36 Energietransport mit einer strömenden Flüssigkeit

Bewegt man nun den linken Kolben nach rechts, indem man dagegen drückt, so bewegt sich gleichzeitig der rechte Kolben. Ist der rechte Kolben frei beweglich, so überträgt man fast keine Energie. Die wenige Energie, die man links hineinsteckt, ist nötig, um die Reibung zu überwinden.

Lässt man aber den rechten Kolben etwas antreiben, so geht das Verschieben des linken Kolbens schwerer: Man steckt links Energie hinein, und diese kommt rechts wieder heraus.

Wir wollen die Stärke P des Energiestroms von links nach rechts berechnen, d. h. durch andere, leicht messbare Größen ausdrücken. Wir fragen nach der Stärke des Energiestroms, der die gedachte Schnittfläche S durchquert: Wie viel Joules fließen in jeder Sekunde durch diese Fläche hindurch?

Was den Energietransport betrifft, ist die im Rohr bewegte Flüssigkeit gleichwertig zu einer Stange, und für eine Stange können wir die Energiestromstärke angeben:

$$P = v \cdot F.$$

Hier ist v die Geschwindigkeit, mit der sich die Stange bewegt, und F die Impulsstromstärke in der Stange.

Dieselbe Formel muss nun auch für die Hydraulikflüssigkeit gelten. v ist dann die Geschwindigkeit, mit der sich die Flüssigkeit bewegt. Die Impulsstromstärke F können wir durch den Druck p und die Querschnittsfläche A des Rohrs ausdrücken:

$$F = A \cdot p$$

Die Energiestromstärke wird damit

$$P = v \cdot A \cdot p$$

Diese Formel ist sehr praktisch, denn man kann mit ihr die Energiestromstärke an jeder Stelle eines Rohrs beliebiger Form und beliebigen Durchmessers berechnen.

Wir betrachten ein komplizierteres Rohr: ein Rohr, dessen Querschnittsfläche von A_1 auf A_2 zunimmt, Abb. 9.37, und vergleichen die Energieströme an den Stellen 1 und 2. Bei 2 fließt die Flüssigkeit langsamer als bei 1, d. h. v_2 ist kleiner als v_1. Es ist nicht schwer, den Zusammenhang zwischen v_1 und v_2 zu finden.

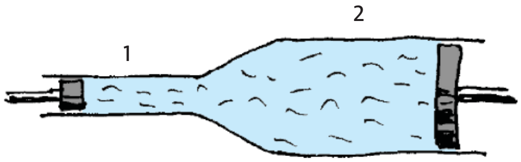


Abb. 9.37 Energietransport in einem Rohr, dessen Querschnittsfläche zunimmt

Wenn der linke Kolben um die Strecke Δx_1 verschoben wird, so wird eine Flüssigkeitsmenge des Volumens

$$\Delta V_1 = A_1 \cdot \Delta x_1$$

nach rechts geschoben. Der rechte Kolben muss nun für so viel Flüssigkeit Platz machen, wie der linke Kolben verdrängt hat, d. h., es muss sein

$$\Delta V_1 = \Delta V_2$$

oder

$$A_1 \cdot \Delta x_1 = A_2 \cdot \Delta x_2. \tag{9.8}$$

Wenn man nun den linken Kolben gleichmäßig bewegt, und zum Verschieben um die Strecke Δx_1 die Zeit Δt braucht, so ist die Geschwindigkeit v_1 des linken Kolbens

$$v_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta t} \tag{9.9}$$

und die Geschwindigkeit v_2 des rechten Kolbens

$$v_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta t} \tag{9.10}$$

Wir dividieren beide Seiten von Gleichung (9.8) durch Δt und erhalten

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

Mit Gleichung (9.9) und Gleichung (9.10) wird daraus

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 .$$

Wir multiplizieren nun noch beide Seiten dieser Gleichung mit dem Druck p der Flüssigkeit, der ja links und rechts gleich ist:

$$p \cdot v_1 \cdot A_1 = p \cdot v_2 \cdot A_2 \tag{9.11}$$

Wir hatten vorher gesehen, dass die Energiestromstärke

$$P = v \cdot A \cdot p. \tag{9.12}$$

ist. In Gleichung (9.11) steht also links die Stärke des Energiestroms bei 1 und rechts die bei 2, und die Gleichung sagt uns, dass beide gleich sind: Die Energie, die man links hineinsteckt, kommt rechts wieder heraus – ein Ergebnis, das dich sicher nicht überrascht.

Die Energiestromstärke ist also an jeder Stelle des Rohrs dieselbe. Dort wo die Rohrquerschnittsfläche kleiner ist, ist die Strömungsgeschwindigkeit größer, wo die Querschnittsfläche größer ist, ist die Strömungsgeschwindigkeit kleiner. Der Energiestrom ist aber überall derselbe.

Gleichung (9.12) sagt uns auch, wie man es anstellen muss, wenn man viel Energie (pro Sekunde) übertragen will: hoher Druck, große Rohrquerschnittsfläche und große Geschwindigkeit. Alle drei Einflussmöglichkeiten haben aber ihre Grenzen. Wird der Druck zu hoch, so platzt das Rohr oder der Schlauch. Ein großer Schlauchquerschnitt kann unpraktisch werden, weil die Schläuche unhandlich werden, und eine hohe Strömungsgeschwindigkeit hat den Nachteil, dass die Energieverluste durch Reibung groß werden. Man sucht daher einen Kompromiss, bei dem alle Nachteile akzeptabel bleiben.

Wir betrachten ein typisches Beispiel: die Energieübertragung von der Pumpe zum Greifarm eines Baggers. Der Druck in den Baggerleitungen beträgt etwa 150 bar = 15 MPa, der Schlauchquerschnitt 6 cm^2 = 0,0006 m^2 und die Strömungsgeschwindigkeit 0,5 m/s. Als Energiestromstärke ergibt sich

$$\begin{aligned} P &= v \cdot A \cdot p \\ &= 0{,}5\ \text{m/s} \cdot 0{,}0006\ \text{m}^2 \cdot 15\ \text{MPa} = 4500\ \text{W}. \end{aligned}$$

Man kann also mit hydraulischen Anlagen bequem Energie transportieren. Solche Anlagen haben aber noch andere Vorteile. Einen davon wollen wir kennenlernen.

Die Impulsstromstärke in Kolben 1 in Abb. 9.38 ist

$$F_1 = A_1 \cdot p,$$

die in Kolben 2 ist

$$F_2 = A_2 \cdot p.$$

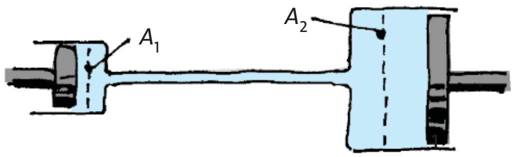


Abb. 9.38 Im rechten Kolben fließt ein größerer Impulsstrom als im linken.

Aus beiden Gleichungen zusammen folgt

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}.$$

Man erzeugt also durch Drücken gegen den linken Kolben im rechten Kolben einen Impulsstrom, der um den Faktor A_2/A_1 stärker ist. Man kann diesen

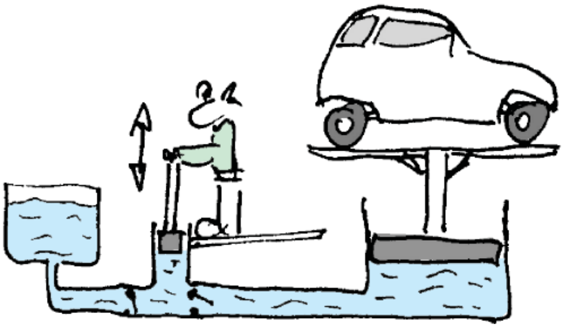


Abb. 9.39 Es ist leicht, das Auto per Hand hochzuheben.

Effekt dazu benutzen, schwere Lasten zu heben. Das schwere Auto in Abb. 9.39 wird mithilfe der Hydraulik per Hand hochgehoben. Aber vergiss nicht: Energie kann man auf diese Weise nicht gewinnen. Das Heben des Autos geht zwar mit der Hydraulik leichter, als wenn man es direkt macht, Abb. 9.40, aber dafür dauert es länger.

Abb. 9.40 Es ist schwer, das Auto per Hand hochzuheben.

Aufgaben

1. Im Schlauch einer Baggerhydraulik herrscht ein Druck von 150 bar. Die Querschnittsfläche des Schlauches ist 5 cm^2, die Strömungsgeschwindigkeit des Hydrauliköls beträgt 20 cm/s. Wie viel Energie wird transportiert? Wie stark ist der Impulsstrom im Schlauch?
2. Am Eingang einer Wasserturbine herrscht ein Druck von 80 bar. Der Rohrdurchmesser beträgt 1 m. Die Turbine bekommt pro Sekunde eine Energiemenge von 12 MJ. Wie schnell strömt das Wasser im Rohr?

10 ENTROPIE UND ENTROPIESTRÖME

Das zweite große Teilgebiet der Physik, dem wir uns zuwenden, ist die Wärmelehre. Schon aufgrund des Namens kann man sich denken, worum es geht: um die Beschreibung von Erscheinungen, die damit zusammenhängen, ob ein Gegenstand wärmer oder kälter ist. Ähnlich wie wir in der Mechanik immer wieder Impulsbilanzen gemacht haben, werden wir es in der Wärmelehre ständig mit Wärmebilanzen zu tun haben.

Auch die Wärmelehre ist wichtig, um Naturerscheinungen und technische Geräte und Maschinen zu verstehen.

Das Leben auf der Erde ist nur möglich dank eines riesigen Wärmestroms, der von der Sonne kommt. Klima und Wetter auf der Erde sind im Wesentlichen durch thermische Vorgänge bestimmt. (Unter „thermisch“ versteht man „die Wärmelehre betreffend“.)

Viele Maschinen funktionieren unter Ausnutzung der Gesetze der Wärmelehre: der Automotor, die Dampfturbine im Kraftwerk, die Wärmepumpe des Kühlschranks.

Der Wärmeverlust jedes Hauses und die Wärmebeschaffung durch die Heizung können mit den Mitteln der Wärmelehre quantitativ beschrieben werden.

Nicht zu vergessen ist die wichtige Rolle, die die Wärme beim Ablauf chemischer Reaktionen spielt.

Es geht also in der Wärmelehre um andere Erscheinungen als in der Mechanik. Aus diesem Grunde benutzt die Wärmelehre andere physikalische Größen. Das bedeutet aber nicht, dass man, wenn man mit der Wärmelehre zu tun hat, die Mechanik ganz vergessen kann. Denn erstens gibt es Größen, die sowohl in der Mechanik als auch in der Wärmelehre gebraucht werden: die Energie und die Energiestromstärke zum Beispiel. Und zweitens gibt es Gesetze, Zusammenhänge und Regeln in der Mechanik, zu denen ein thermisches Gegenstück existiert. Man braucht also nicht völlig neu zu lernen, um die Wärmelehre zu verstehen.

10.1 Entropie und Temperatur

Wie jedes Mal, wenn wir mit einem neuen Gebiet der Physik beginnen, müssen wir zunächst unsere wichtigsten Werkzeuge kennenlernen: die physikalischen Größen, mit denen wir arbeiten werden. In der Mechanik hatten wir mit zwei Größen begonnen, um den Bewegungszustand eines Körpers zu beschreiben: mit der Geschwindigkeit und dem Impuls. Entsprechend beginnen wir die Wärmelehre mit zwei Größen, die den Wärmezustand eines Körpers beschreiben.

Die eine dieser Größen, die Temperatur, kennst du schon. Man kürzt sie ab durch den griechischen Buchstaben ϑ (sprich: Teta) und misst sie in der Einheit °C (sprich: Grad Celsius). Den Satz „Die Temperatur beträgt 18 Grad Celsius“ kann man also abgekürzt schreiben: $\vartheta = 18$ °C.

Auch die zweite Größe, die wir brauchen, müsstest du kennen, allerdings unter einem anderen Namen als dem in der Physik gebräuchlichen. Es handelt sich bei ihr um das, was man umgangssprachlich „Wärmemenge“ nennt, oder einfach „Wärme“. Um den Unterschied zwischen Wärmemenge und Temperatur zu zeigen, machen wir ein ganz einfaches Experiment, Abb. 10.1. In einem Glas A befindet sich 1 l Wasser mit einer Temperatur von 80 °C. Wir gießen die Hälfte dieses Wassers in ein anderes, leeres Glas B. Was geschieht dabei mit der Temperatur und was mit der Wärmemenge? Die Temperatur des Wassers in jedem der Gläser A und B ist nach dem Umgießen dieselbe wie die des Wassers in A vor dem Umgießen. Die Wärmemenge dagegen hat sich beim Umgießen auf die Gläser A und B verteilt. Wenn in A ursprünglich 10 Wärmeeinheiten waren, so befinden sich am Ende 5 Einheiten in A und 5 in B.

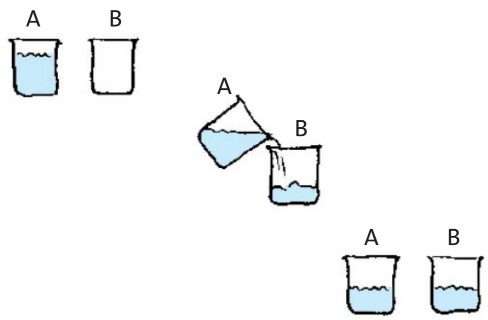


Abb. 10.1 Die Hälfte des Wassers in Behälter A wird in Behälter B gegossen.

Die Temperatur charakterisiert also den Zustand des Warmseins (oder des Kaltseins) eines Körpers, unabhängig von dessen Größe. Die Wärmemenge dagegen ist etwas, das in dem Körper enthalten ist.

Diese umgangssprachliche Wärmemenge wird in der Physik mit einem Fachausdruck bezeichnet: Sie heißt Entropie, das Symbol der Größe ist S und die Maßeinheit Carnot, abgekürzt Ct. Wenn der Entropieinhalt eines Körpers 20 Carnot beträgt, kann man daher schreiben:

$$S = 20 \text{ Ct.}$$

Die Maßeinheit ist benannt nach Sadi Carnot (1796 – 1832), einem Physiker, der wesentlich zur Erfindung der Entropie beigetragen hat.

Wenn wir im Folgenden die Eigenschaften der Größe Entropie untersuchen, solltest du immer daran denken, dass es sich dabei um die umgangssprachliche Wärme handelt.

Wir vergleichen die beiden Wassergläser von Abb. 10.2. In beiden ist gleich viel Wasser. Das Wasser im linken Glas ist heiß, es hat eine Temperatur von 70 °C, das Wasser im rechten Glas ist kühl, seine Temperatur beträgt 10 °C. Welches Glas enthält mehr Entropie? (In welchem Glas steckt mehr Wärme?) Natürlich im linken.

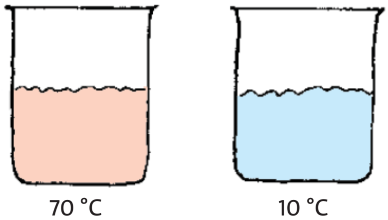


Abb. 10.2 Das Wasser im linken Glas enthält mehr Entropie als das im rechten.

> Je höher die Temperatur eines Gegenstandes ist, desto mehr Entropie enthält er.

Wir vergleichen nun die Wassergläser von Abb. 10.3. Hier sind die Temperaturen gleich, aber die Masse des Wassers ist links und rechts nicht dieselbe. Welches Glas enthält mehr Entropie? Wieder das linke.

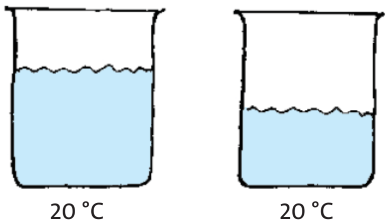


Abb. 10.3 Das Wasser im linken Glas enthält mehr Entropie als das im rechten.

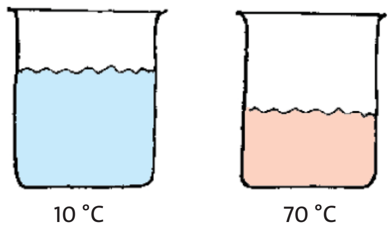


Abb. 10.4 Hier lässt es sich nicht leicht entscheiden, welches Glas mehr Entropie enthält.

Je größer die Masse eines Gegenstandes ist, desto mehr Entropie enthält er.

Welches der Gläser von Abb. 10.4 mehr Entropie enthält, können wir im Augenblick nicht entscheiden.

Wir betrachten nun erneut einen Versuch wie in Abb. 10.1. In Glas A befinde sich 1 l Wasser mit einer Entropiemenge von 4 000 Ct. Wir gießen 1/4 des Wassers, d. h. 250 ml, in das andere, leere Glas B. Wie viel Entropie befindet sich nach dem Umgießen in A, wie viel in B? Beim Umgießen wurde die Entropie in demselben Verhältnis geteilt wie die Wassermenge. Es wurden daher 1 000 Ct in Glas B befördert, 3 000 Ct sind in A zurückgeblieben.

Was kann man sich unter 1 Carnot vorstellen? Handelt es sich um viel oder wenig Entropie? 1 Carnot ist eine recht handliche Einheit: 1 cm^3 Wasser von 25 °C enthält 3,88 Ct. Oder als grobe Merkregel:

1 cm^3 Wasser von Normaltemperatur enthält etwa 4 Ct.

Aufgaben

1. Die Luft in einem Zimmer A von 75 m^3 Rauminhalt hat eine Temperatur von 25°C. Die Luft in einem anderen Zimmer B mit einem Rauminhalt von 60 m^3 hat eine Temperatur von 18°C. Welches Zimmer enthält mehr Entropie?
2. Der Kaffee in einer vollen Kaffeekanne enthält eine Entropiemenge von 3900 Ct. Es wird nun Kaffee in drei Tassen ausgeschenkt, in jede Tasse gleich viel. Danach ist die Kanne noch halb voll. Wie viel Entropie befindet sich nach dem Ausschenken noch in der Kanne? Wie viel befindet sich in jeder Tasse?

10.2 Der Temperaturunterschied als Antrieb für einen Entropiestrom

Wir tauchen einen Behälter A mit heißem Wasser in einen Behälter B mit kaltem Wasser, Abb. 10.5. Wir wollen beobachten, was passiert, und die Beobachtung erklären.

Zunächst die Beobachtung: Die Temperatur des Wassers in A sinkt, die des Wassers in B steigt.

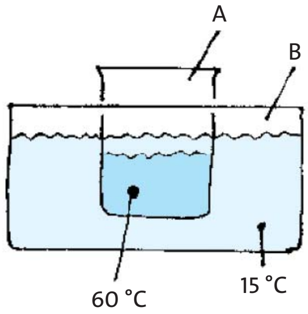


Abb. 10.5 Entropie fließt aus dem inneren Behälter A in den äußeren Behälter B.

Die Temperaturen laufen aufeinander zu und werden schließlich gleich. Die Temperatur von B steigt aber nicht über die von A hinaus.

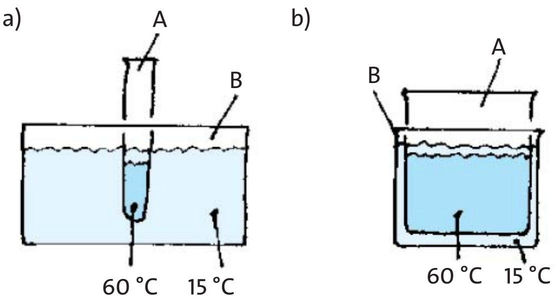


Abb. 10.6 In beiden Fällen fließt Entropie vom inneren in den äußeren Behälter.

Und die Erklärung: Es fließt Entropie von A nach B, und zwar so lange, bis die Temperaturen gleich geworden sind.

Man kann den Versuch mit anderen Behältern wiederholen, Abb. 10.6a und Abb. 10.6b. Immer stellt sich das Wasser in beiden Behältern auf dieselbe Temperatur ein. Im Fall von Abb. 10.6a liegt diese Endtemperatur näher bei der Anfangstemperatur von B, in Abb. 10.6b liegt sie näher bei der Anfangstemperatur von A. Allen Fällen gemeinsam ist, dass schließlich

$$\vartheta_A = \vartheta_B$$

wird. Natürlich kann man so beginnen, dass der innere Behälter A die niedrigere und der äußere Behälter B die höhere Temperatur hat. Auch in diesem Fall laufen die Temperaturen aufeinander zu und stellen sich schließlich auf denselben Wert ein. Wir schließen daraus:

> Entropie strömt von selbst von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur.

Sicher kommt dir dieser Satz bekannt vor. Wenn du nach vorn blätterst, wirst du zwei andere Varianten davon wiederfinden. (Und auch weiter hinten wird er uns wieder begegnen.) Man kann daher einen Temperaturunterschied $\vartheta_A - \vartheta_B$ als Antrieb für einen Entropiestrom auffassen.

> Ein Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom.

Dass der Entropiestrom in den Versuchen in Abb. 10.5 und Abb. 10.6 schließlich aufhört zu fließen, ist nun leicht zu verstehen: Sobald die Temperaturen gleich geworden sind, ist der Antrieb für den Entropiestrom verschwunden.

Den Zustand der Temperaturgleichheit, der sich am Ende einstellt, nennt man thermisches Gleichgewicht.

Vor dir steht eine Tasse Tee. Der Tee ist noch zu heiß zum Trinken. Du wartest also, bis er sich abgekühlt hat. Was ist eigentlich beim Abkühlen passiert? Da die Temperatur des Tees zunächst höher ist als die der Luft und des Tisches, fließt ein Entropiestrom vom Tee in die Umgebung. Wird die Umgebung dadurch wärmer? Wenn man es genau nimmt: ja. Nun verteilt sich aber die Entropie, die vom Tee kommt, so weit, sie verdünnt sich so stark, dass man praktisch nichts mehr von ihr merkt.

Wir berühren verschiedene Gegenstände im Klassenzimmer. Manche fühlen sich kühl an: das Metall der Schulbänke, die Betonpfosten. Andere scheinen weniger kühl zu sein, z. B. das Holz der Schulbänke. Noch andere sind fast mollig warm: ein Wollhandschuh oder ein Stück Styropor. Die Temperatur eines eisernen Gegenstandes scheint also niedriger zu sein als die eines hölzernen. Diese Feststellung müsste dich eigentlich stutzen lassen. Wir hatten doch gerade formuliert: „Entropie strömt von selbst von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur.“ Demnach müsste ständig Entropie von den Holzteilen in die Eisenteile der Schulbank fließen. Dadurch würde das Eisen wärmer und das Holz kälter, bis …? Bis die Temperaturen gleich sind.

Bevor wir weiter spekulieren, wollen wir die Temperaturen verschiedener Gegenstände im Klassenzimmer mit einem Temperaturmessgerät bestimmen, sodass wir uns nicht auf unser Gefühl verlassen müssen. Das Ergebnis ist überraschend. Alle Temperaturen sind gleich. Eisen, Holz und Styropor haben alle dieselbe Temperatur, vorausgesetzt, die Gegenstände waren lange genug in demselben Raum, sodass sich ihre Temperaturen angleichen konnten.

Nur im Winter werden die Gegenstände, die sich weiter oben im Zimmer befinden, eine etwas höhere Temperatur haben als die, die weiter unten sind. Das liegt daran, dass die von der Heizung erwärmte Luft nach oben steigt. Das Einstellen des thermischen Gleichgewichts wird also durch die Heizung ständig gestört. Im Sommer dagegen kann sich das Gleichgewicht im Allgemeinen gut einstellen. Wir ziehen zunächst die Schlussfolgerung: Unser Gefühl für „warm“ und „kalt“ hat uns getäuscht. Wie diese Täuschung zustande kommt und warum es eigentlich gar keine Täuschung ist, erfährst du in einem der nächsten Abschnitte.

Aufgaben

1. (a) Beim Kochen geht Entropie von der Kochplatte in den Topf. Warum? (b) Der Topf wird auf einen Untersetzer auf dem Tisch gestellt. Danach geht Entropie vom Topf in den Untersetzer. Warum? (c) Eine gekühlte Cola-Flasche wird auf den Tisch gestellt. Der Tisch wird an der Stelle, wo die Flasche steht, kalt. Warum?
2. Ein großer Metallklotz A hat eine Temperatur von 120 °C, ein kleiner Klotz B aus demselben Metall hat eine Temperatur von 10 °C. Die Klötze werden in Kontakt gebracht, sodass Entropie vom einen zum anderen fließen kann. Von welchem zu welchem fließt sie? Liegt die Endtemperatur näher bei 120 °C oder näher bei 10 °C?
3. Vor dir liegen ein kleiner heißer Metallklotz und ein großer kühler. (a) Kannst du sagen, welcher von beiden mehr Entropie enthält? (b) Du bringst die Klötze miteinander in Kontakt. Was passiert mit Temperatur und Entropie? (c) Welcher Klotz enthält am Ende mehr Entropie?

10.3 Die Wärmepumpe

Dass die Entropie von selbst vom Gegenstand hoher zum Gegenstand niedriger Temperatur geht, bedeutet nicht, dass sie überhaupt nicht in umgekehrter Richtung fließen könnte, d.h. von kalt nach heiß. Sie kann es — nur eben nicht „von selbst“. Damit sie es tut, muss man „Gewalt anwenden“: Man braucht eine Pumpe für die Entropie. Als Name für ein solches Gerät hat sich das Wort Wärmepumpe eingebürgert.

Eine Wärmepumpe hat heutzutage jeder im Haus: Sie ist Teil des Kühlschranks und dient dazu, die Entropie aus dem Innern des Kühlschranks nach außen zu befördern. Bevor wir uns den Kühlschrank genauer ansehen, müssen wir einiges Grundsätzliche zur Wärmepumpe lernen.

Wie jede andere Pumpe, so hat auch die Wärmepumpe zwei „Anschlüsse“ für das, was gepumpt werden soll: einen Eingang und einen Ausgang. Eine Wasserpumpe hat einen Eingang und einen Ausgang für Wasser, eine Impulspumpe hat einen Ein- und einen Ausgang für Impuls. Entsprechend hat die Wärmepumpe einen Eingang und einen Ausgang für Entropie, Abb. 10.7. Sowohl der Eingang als auch der Ausgang besteht aus einer Rohrschlange, durch die eine Flüssigkeit oder ein Gas strömt. Auf diese Art wird die Entropie in die Pumpe hinein- bzw. aus ihr heraustransportiert.

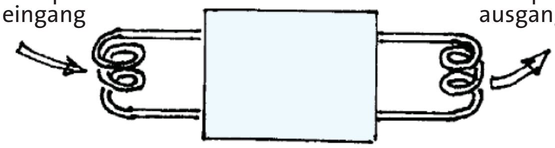


Abb. 10.7 Die Wärmepumpe hat einen Eingang und einen Ausgang für Entropie.

> Eine Wärmepumpe befördert Entropie von Stellen niedrigerer zu Stellen höherer Temperatur.

Einen Gegenstand kühlen heißt, dass man ihm Entropie entzieht; einen Gegenstand heizen heißt, dass man ihm Entropie zuführt. Man erkennt aus Abb. 10.7, dass man eine Wärmepumpe sowohl zum Kühlen als auch zum Heizen benutzen kann. Tatsächlich werden Wärmepumpen für beide Zwecke eingesetzt.

Wir schauen uns den Kühlschrank etwas genauer an, Abb. 10.8. Die Wärmepumpe selbst befindet sich unten, im hinteren Teil des Kühlschranks. Ebenfalls von hinten zu sehen ist der Entropieausgang: eine Rohrschlange, die einen großen Teil der Rückseite des Kühlschranks einnimmt. Damit die Entropie besser in die Luft übergehen kann, befindet sich ein Metallgitter zwischen den Rohren. Dass die Entropie hier den Kühlschrank verlässt, merkt man daran, dass diese Rohrschlange warm ist, solange der Kühlschrank läuft. Der Entropieeingang befindet sich im Innern des Kühlschranks: eine Rohrschlange, die in die Wände des Gefrierfachs eingelassen ist.

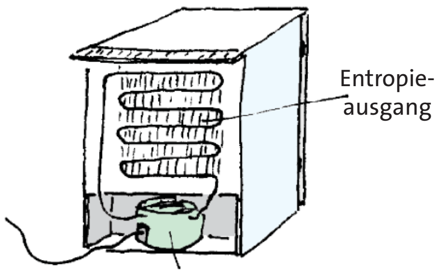


Abb. 10.8 Kühlschrank von hinten. Man sieht die Wärmepumpe und die Rohrschlangen, über die die Entropie den Kühlschrank verlässt.

Manche Häuser werden mit einer Wärmepumpe geheizt. Man nimmt hier die Entropie aus der Außenluft oder, falls vorhanden, aus einem vorbeifließenden Bach oder Fluss. Das Wasser in manchen Schwimmbädern wird ebenfalls auf diese Art geheizt.

Ein anderes Gerät, in dem eine Wärmepumpe angewendet wird, ist die Klimaanlage. Eine Klimaanlage stellt im Innern eines Gebäudes eine bestimmte Temperatur und eine bestimmte Luft-

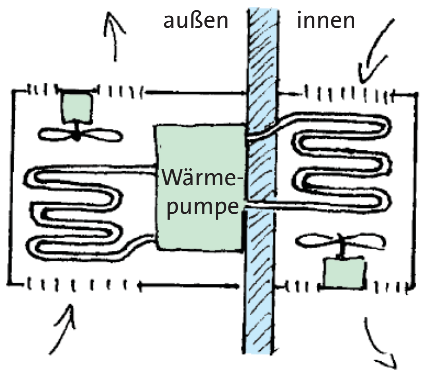


Abb. 10.9 Einfaches Klimagerät. Die Gebläse innen und außen sind dazu da, den Wärmeaustausch mit der Luft zu verbessern.

feuchtigkeit ein. Hierzu muss sie die Luft des Gebäudes unter anderem kühlen können, und das tut sie mit einer Wärmepumpe. Abb. 10.9 zeigt ein einfaches Klimagerät, das die Luft im Innern des Raums nur kühlen kann.

Aufgaben

1. Untersuche den Kühlschrank bei euch zu Hause. Suche die Wärmepumpe, den Eingang und den Ausgang für die Entropie. Halte, wenn es geht, eine Hand an die Rohrschlangen des Entropieausgangs.
2. Was passiert mit der Entropie, wenn man die Kühlschranktür eine längere Zeit auflässt?

10.4 Die absolute Temperatur

Wie viel Entropie kann man aus einem Gegenstand herauspumpen? Wie viel Entropie enthält er?

Wir müssen uns zunächst klar machen, dass es sich hier um zwei verschiedene Fragen handelt.

Wenn es nur positive Entropie gibt, so kann man aus einem Gegenstand nur so viel Entropie herauspumpen, wie drinsteckt. Genauso, wie man aus einem Behälter nicht mehr Luft herauspumpen kann als darin enthalten ist.

Anders wäre es, wenn es negative Entropie gäbe. Dann könnte man aus einem Gegenstand noch Entropie herausholen, wenn sein Entropieinhalt null Carnot beträgt: Wenn man z. B. weitere 5 Ct herausholt, so beträgt danach der Entropieinhalt eben minus 5 Carnot. Dass so etwas denkbar ist, wissen wir vom Impuls: Einem ruhenden Körper, d. h. einem Körper mit dem Impuls null Huygens, kann man Impuls entziehen; sein Impuls wird dann negativ.

Wir wollen daher die eingangs gestellten Fragen durch eine andere ersetzen: Gibt es negative Entropie? (Man würde dann vielleicht sagen, negative Entropie ist das, was man umgangssprachlich „Kälte“ oder „Kältemenge“ nennt.)

Im Prinzip ist die Antwort auf diese Frage leicht zu finden. Alles was man braucht, ist eine sehr gute Wärmepumpe. Man nimmt irgendeinen Gegenstand, einen Ziegelstein zum Beispiel, und pumpt Entropie heraus, solange es geht. Versuchen wir es zunächst mit dem Kühlschrank, so sinkt die Temperatur des Steins vielleicht auf –5 °C. Weiter geht es nicht, weil die Wärmepumpe des Kühlschranks nicht mehr schafft. Mehr Entropie kann man dem Stein entziehen, wenn man ihn in die Gefriertruhe legt: Die Temperatur sinkt dann vielleicht auf etwa –18 °C. Nun gibt es bessere (und teurere) Wärmepumpen. Damit erreicht man noch tiefere Temperaturen. Man nennt solche Wärmepumpen Kältemaschinen. Es gibt Kältemaschinen, mit denen man unseren Stein auf –200 °C bringen könnte. Bei dieser Temperatur ist die Luft schon flüssig. Tatsächlich werden solche Maschinen auch zur Luftverflüssigung verwendet. Und es gibt Kältemaschinen, mit denen man noch mehr Entropie aus unserem Stein herausholen könnte. Man würde es daran erkennen, dass die Temperatur noch weiter sinkt.

So erreicht man –250 °C, dann –260 °C, und mit größerem Aufwand –270 °C, –271 °C, –272 °C, –273 °C. Bei –273,15 °C aber hört es auf. Trotz größter Anstrengung und Einsatz aller Mittel lässt sich diese Temperatur nicht unterschreiten. Die Erklärung hierfür ist einfach:

- Bei dieser Temperatur enthält unser Stein keine Entropie mehr.
- Die Entropie kann keine negativen Werte annehmen.

> Die tiefste Temperatur, die ein Gegenstand haben kann, ist –273,15°C. Bei dieser Temperatur enthält er keine Entropie mehr.
> Bei $\vartheta = -273{,}15°\text{C}$ ist $S = 0$ Ct.

Nachdem man die Entdeckung gemacht hatte, dass es eine tiefste Temperatur gibt, war es naheliegend, eine neue Temperaturskala einzuführen. Diese neue absolute Temperaturskala ist gegen die Celsiusskala einfach so verschoben, dass ihr Nullpunkt bei –273,15 °C liegt. Das Symbol für die absolute Temperatur ist T, die Maßeinheit Kelvin, abgekürzt K. Abb. 10.10 zeigt, wie die beiden Skalen miteinander zusammenhängen. Beachte, dass eine Temperaturdifferenz von 1 °C genauso groß ist wie eine Temperaturdifferenz von 1 K.

Die Siedetemperatur des Wassers ist auf der Celsiusskala

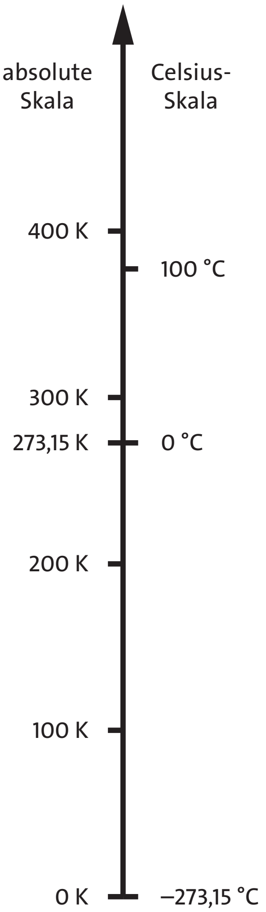


Abb. 10.10 Celsiusskala und absolute Temperaturskala

$$\vartheta = 100\ °\mathrm{C}$$

und auf der absoluten Skala

$$T = 373{,}15\ \mathrm{K}.$$

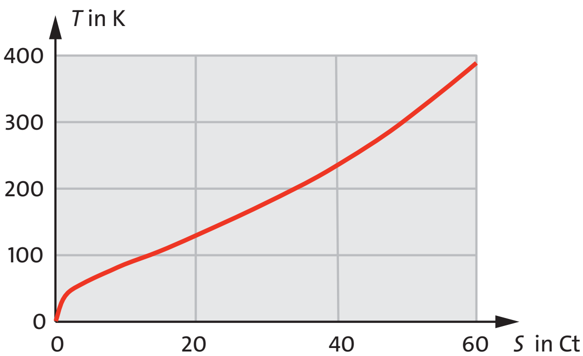


Abb. 10.11 Temperatur als Funktion des Entropieinhalts für 100 g Kupfer

> Der Nullpunkt der absoluten Temperaturskala liegt bei −273,15 °C. Die Maßeinheit der absoluten Temperatur ist das Kelvin.

In Abb. 10.11. ist der Zusammenhang zwischen Entropieinhalt und Temperatur für ein Stück Kupfer von 100 g dargestellt.

Aufgaben

1. Rechne die folgenden Celsiustemperaturen in absolute Temperaturen um:

0° C	(Schmelztemperatur des Wassers)
25° C	(Normaltemperatur)
100° C	(Siedetemperatur des Wassers)
−183° C	(Siedetemperatur des Sauerstoffs)
−195,8° C	(Siedetemperatur des Stickstoffs)
−268,9° C	(Siedetemperatur des Heliums)
−273,15° C	(absoluter Nullpunkt)

2. Rechne die folgenden absoluten Temperaturen in Celsiustemperaturen um:

13,95 K	(Schmelztemperatur des Wasserstoffs)
20,35 K	(Siedetemperatur des Wasserstoffs)
54,35 K	(Schmelztemperatur des Sauerstoffs)
63,15 K	(Schmelztemperatur des Stickstoffs)

3. Wie viel Entropie enthält 1 kg Kupfer bei einer Temperatur von 20 °C? Benutze zur Beantwortung der Frage Abb. 10.11.

10.5 Entropieerzeugung

Um einen Raum zu heizen, kann man eine Wärmepumpe benutzen: Man holt Entropie von draußen ins Haus herein. Tatsächlich funktionieren die meisten Raumheizungen aber anders: Man verbrennt einen Brennstoff: Heizöl, Kohle,

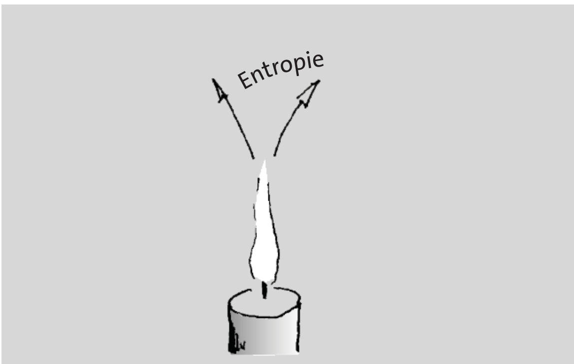


Abb. 10.12 In der Flamme wird Entropie erzeugt.

Holz oder ein brennbares Gas. Eine Verbrennung ist eine chemische Reaktion, bei der sich Brennstoff und Sauerstoff in andere Stoffe verwandeln, meist in Kohlenstoffdioxid und (gasförmiges) Wasser. Woher kommt die Entropie, die bei einer Verbrennung von den Flammen abgegeben wird? Sie war vorher weder im Brennstoff noch im Sauerstoff enthalten, denn beide Stoffe waren kalt. Offenbar entsteht sie bei der Verbrennung neu. In der Flamme wird Entropie erzeugt, Abb. 10.12.

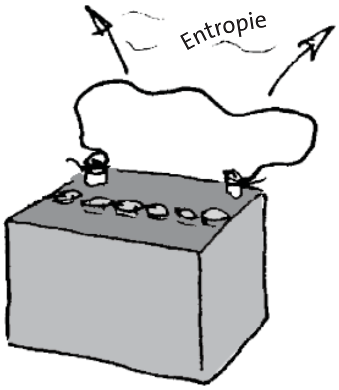


Abb. 10.13 Durch den Draht fließt ein elektrischer Strom. Dabei wird Entropie erzeugt.

Ein anderer Heizungstyp ist die Elektroheizung. Durch einen dünnen Draht wird ein starker elektrischer Strom geschickt. Der Draht erwärmt sich dabei. Im Draht wird Entropie erzeugt, Abb. 10.13. Viele elektrische Geräte arbeiten nach diesem Prinzip: die Kochplatte, das Bügeleisen, der Tauchsieder, die Heizung des Föhns, die Glühlampe.

Du kennst eine dritte Methode, Entropie zu erzeugen: durch mechanische Reibung. Wenn man eine Kletterstange zu schnell herunterrutscht, spürt man das Entstehen der Entropie auf unangenehme Weise. Man merkt es auch, wenn man mit einem stumpfen Bohrer bohrt oder mit einer stumpfen Säge sägt. An der Berührungsfläche der aneinander reibenden Gegenstände wird Entropie erzeugt.

Bei all diesen Vorgängen wird die Entropie wirklich neu erzeugt, sie wird nicht von irgendwo anders her herangebracht.

Entropie kann erzeugt werden
- bei einer chemischen Reaktion (z. B. Verbrennung);
- in einem Draht mit einem elektrischen Strom;
- durch mechanische Reibung.

Man kann alle diese Vorgänge als eine Art Reibung auffassen. Immer, wenn etwas durch eine Verbindung oder Leitung fließt, die dem entsprechenden Strom einen Widerstand entgegensetzt, findet „Reibung" statt. Bei der mechanischen Reibung fließt Impuls von einem Körper auf einen anderen über eine Verbindung, die den Impuls schlecht leitet. Bei den elektrischen Heizgeräten fließt Elektrizität durch einen Draht, der dem elektrischen Strom einen Widerstand entgegensetzt. Und auch bei einer chemischen Reaktion ist eine Art Reibungswiderstand zu überwinden, der Reaktionswiderstand.

Wir haben die Frage diskutiert, woher man die Entropie bekommt, um einen Raum oder einen Gegenstand zu erwärmen. Wir wollen uns nun mit dem umgekehrten Problem befassen: Ein Gegenstand soll gekühlt werden. Eine Methode kennen wir bereits. Man kann Entropie aus dem Gegenstand mit einer Wärmepumpe herauspumpen.

Eine zweite Methode funktioniert, wenn der Gegenstand wärmer ist als seine Umgebung (wenn seine Temperatur höher ist). Was tut man, wenn der Tee zu heiß ist? Man wartet. Die Entropie fließt von allein in die Umgebung ab.

In beiden Fällen, nämlich mit und ohne Wärmepumpe, taucht die Entropie, die aus dem zu kühlenden Gegenstand verschwindet, an einer anderen Stelle wieder auf. Könnte man die Entropie nicht irgendwie endgültig zum Verschwinden bringen? Könnte man sie nicht verschwinden lassen, ohne dass sie anderswo wieder auftaucht? Könnte man sie nicht vernichten? Schließlich haben wir doch vorher gesehen, dass man sie aus nichts erzeugen kann.

Viele Erfinder und viele Naturwissenschaftler haben das versucht — ohne Erfolg. Wir sind heute fest davon überzeugt, dass man Entropie nicht vernichten kann.

Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.

Wir wollen uns bei dieser Gelegenheit an zwei andere Größen erinnern: an Energie und Impuls. Diese beiden Größen können weder erzeugt noch vernichtet werden, und das hatten wir stets als selbstverständlich vorausgesetzt. Wenn die Energiemenge an irgendeiner Stelle zunimmt, muss sie an einer anderen Stelle abnehmen, und wenn sie an einem Ort abnimmt, so muss sie an einem anderen zunehmen. Das Entsprechende gilt für den Impuls.

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.
Impuls kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Die Erzeugbarkeit der Entropie wirft interessante Fragen auf und hat merkwürdige Konsequenzen.

Hier ein erstes Problem: Entropie kann neu entstehen und entsteht neu in unzähligen Vorgängen, die auf der Erde ablaufen. Eine besonders ergiebige Entropiequelle stellen Verbrennungen dar. Bedenke, dass Verbrennungen nicht nur in Öfen, Heizkesseln und Automotoren stattfinden, sondern in viel größerem Ausmaß in der Natur: In allen Lebewesen, von den Mikroben bis zu den Säugetieren, laufen ständig Oxidations-, d. h. Verbrennungsvorgänge ab, und dabei wird Entropie erzeugt. Müsste nicht unter diesen Umständen die Entropiemenge der Erde immer größer werden, müsste nicht die Erde immer wärmer werden? Tatsächlich ist die Temperatur der Erde, von recht kleinen Schwankungen abgesehen, über Jahrmillionen konstant geblieben. Die Erklärung: Es genügt nicht, die Erde allein zu betrachten. Erstens bekommt die Erde ständig Entropie mit dem Licht von der Sonne. (Auch hier fließt die Entropie von der hohen zur niedrigen Temperatur: Die Sonne hat an ihrer Oberfläche eine Temperatur von etwa 6000 K, die Temperatur der Erdoberfläche beträgt etwa 300 K.) Und zweitens gibt die Erde ständig Entropie an das Weltall ab. (Wieder geht die Entropie von der hohen zur niedrigen Temperatur: Der Weltraum hat eine Temperatur von etwa 3 K.) Auch die von der Erde abgegebene Entropie wird von Licht getragen, allerdings von unsichtbarem Infrarotlicht. Dieses Infrarotlicht trägt nun gerade so viel Entropie weg, dass die Temperatur der Erde nahezu konstant bleibt. Es bleibt natürlich die Frage, was denn mit dem ganzen Weltraum passiert, wenn dessen Entropie ständig zunimmt. Diese Frage ist bis heute nicht beantwortet. Sie stellt aber im Grunde nur ein kleines Problem dar, verglichen mit den anderen unbeantworteten Fragen über Struktur und Entwicklung des Kosmos.

Dass man Entropie erzeugen, aber nicht vernichten kann, hat noch eine andere merkwürdige Konsequenz. Jemand projiziert ein Video (ohne Ton), sagt dir aber nicht, ob das Video vorwärts oder rückwärts läuft. Kannst du erkennen, in welche Richtung es läuft? Das „Video“ von Abb. 10.14 zeigt, wenn er richtig herum abgespielt wird, eine brennende Kerze. Falsch abgespielt zeigt er etwas, was es in Wirklichkeit nicht gibt: eine Kerze, die von selbst größer wird. Das Video zeigt also einen nicht umkehrbaren Vorgang. Warum ist dieser Vorgang nicht umkehrbar? Weil bei ihm Entropie erzeugt wird. Eine Umkehrung würde bedeuten, dass Entropie vernichtet wird — und das gibt es nicht.

Einen anderen nicht umkehrbaren Vorgang zeigt die Bildfolge von Abb. 10.15: Eine Person rutscht an einer Kletterstange herunter. Auch dieser Vorgang ist deshalb nicht umkehrbar, weil Entropie erzeugt wird. Es gibt jedoch durchaus Vorgänge, die sowohl vorwärts als auch rückwärts

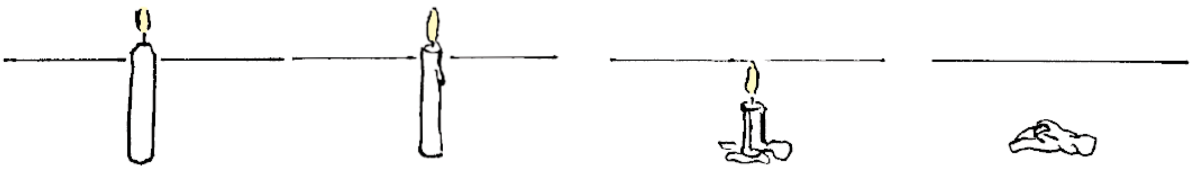


Abb. 10.14 Das Abbrennen einer Kerze ist ein Vorgang, der nicht umkehrbarer ist.

Abb. 10.16 Sind die Bilder richtig angeordnet?

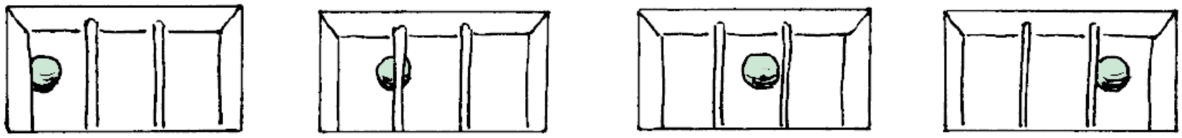


Abb. 10.15 Das Vorbeifliegen des Balls ist ein umkehrbarer Vorgang.

ablaufen können: alle Vorgänge, bei denen keine Entropie erzeugt wird. Abb. 10.16 zeigt einen an einem Fenster vorbeifliegenden Ball. War der Ball von links nach rechts geflogen, wie es der Film zeigt? Oder läuft der Film in die falsche Richtung, und der Ball war in Wirklichkeit von rechts nach links geflogen?

> Vorgänge, bei denen Entropie erzeugt wird, sind nicht umkehrbar.

Aufgaben

1. An eine Batterie ist eine Lampe angeschlossen. Die Lampe leuchtet, und die Batterie wird langsam leer. Schildere den hierzu umgekehrten Vorgang. (Nimm dazu an, es sei möglich, Entropie zu vernichten.)
2. Schildere im Einzelnen, welche Vorgänge ablaufen würden, wenn der Vorgang „fahrendes Auto“ rückwärts abliefe und es möglich wäre, Entropie zu vernichten.
3. Eine Rad fahrende Person bremst. Was würde im Einzelnen passieren, wenn der Vorgang rückwärts abliefe? (Nimm an, Entropie dürfte vernichtet werden.)

10.6 Die Entropiestromstärke

Der Metallstab in Abb. 10.17 wird an seinem linken Ende erhitzt, am rechten gekühlt. In anderen Worten: Links wird dem Stab Entropie zugeführt, rechts wird ihm Entropie entnommen. Im Stab fließt Entropie von links nach rechts, von der hohen zur niedrigen Temperatur. Wir sagen, es fließt ein Entropiestrom.

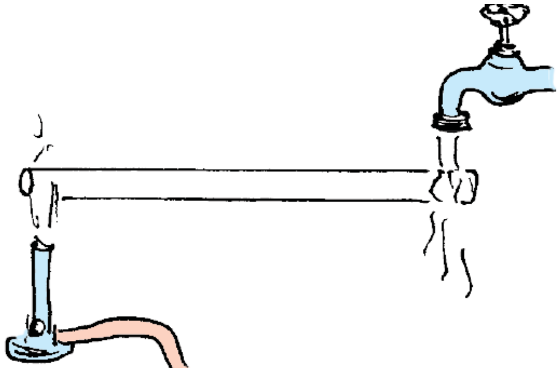


Abb. 10.17 Vom heißen zum kalten Ende des Stabs fließt ein Entropiestrom.

Die Zahl der Carnot, die pro Sekunde durch den Stab fließen, gibt uns die Entropiestromstärke an:

$$\text{Entropiestromstärke} = \frac{\text{Entropie}}{\text{Zeit}}$$

Wir benutzen für die Entropiestromstärke das Symbol I_S. Damit können wir schreiben:

$$I_S = \frac{S}{t}$$

Die Maßeinheit für die Entropiestromstärke ist Carnot pro Sekunde, abgekürzt Ct/s.

Wovon hängt die Stärke des Entropiestroms zwischen zwei Stellen A und B ab? Wir werfen einen Blick auf Abb. 10.18. Bei der oberen Anordnung ist der Temperaturunterschied zwischen Körper A und Körper B größer als bei der unteren. Sonst ist oben und unten alles gleich. Da bei

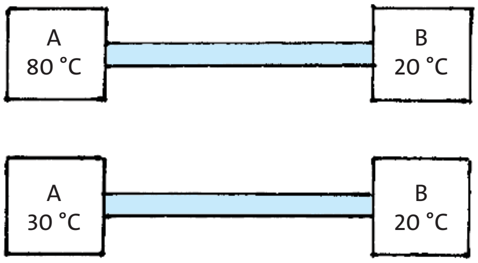


Abb. 10.18 Bei der oberen Anordnung ist der Temperaturunterschied zwischen Körper A und Körper B größer.

der oberen Anordnung der Antrieb für den Entropiestrom größer ist als bei der unteren, ist dort auch die Stromstärke größer.

> Je größer die Temperaturdifferenz zwischen zwei Stellen (je größer der Antrieb) ist, desto stärker ist der Entropiestrom, der von der einen zur anderen Stelle fließt.

10.7 Der Wärmewiderstand

Die Entropiestromstärke kann bei gleicher Temperaturdifferenz verschieden sein. Sie hängt nämlich nicht nur von der Temperaturdifferenz ab, sondern auch von der Art der Verbindung, vom Wärmewiderstand der Verbindung, Abb. 10.19. Wovon hängt der Wärmewiderstand einer Verbindung ab?

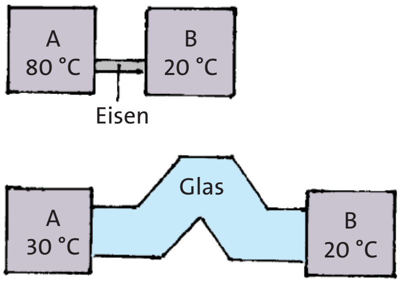


Abb. 10.19 Verbindungen mit verschiedenen Wärmewiderständen

Abb. 10.20 zeigt zwei Entropieleitungen a und b, zwischen deren Enden dieselbe Temperaturdifferenz liegt, nämlich 60 K. Der Querschnitt von Leitung b ist aber doppelt so groß wie der von Leitung a. Nun fließt in jeder Hälfte von Leitung b (in der oberen und in der unteren) so viel En-

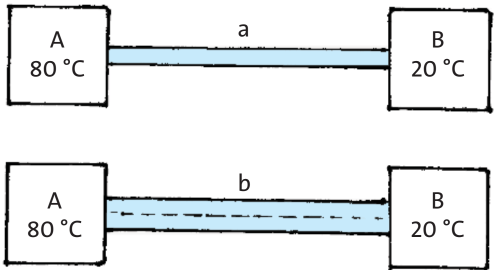


Abb. 10.20 Durch die dickere Leitung fließt ein stärkerer Entropiestrom.

tropie wie in Leitung a; in beiden Hälften zusammen also doppelt so viel wie in Leitung a.

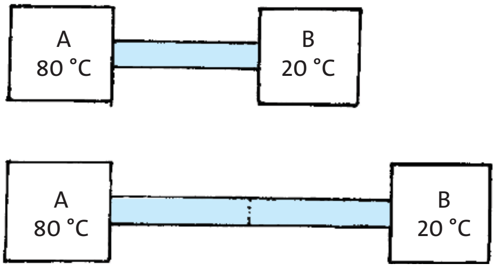


Abb. 10.21 Durch die kürzere Leitung fließt ein stärkerer Entropiestrom.

In Abb. 10.21 sind wieder zwei Leitungen a und b dargestellt. Hier ist Leitung b doppelt so lang wie Leitung a. Wir vergleichen eine der beiden Hälften von b, z. B. die linke, mit Leitung a. Beide sind völlig gleich gebaut, aber an a liegt eine größere Temperaturdifferenz als an der Hälfte von b. Daher fließt durch dieses Stück von b ein schwächerer Entropiestrom als durch a. Durch das andere Stück von b fließt dann natürlich auch ein schwächerer Entropiestrom.

Abb. 10.22 schließlich zeigt zwei Leitungen, die gleich lang sind und die gleiche Querschnitts-

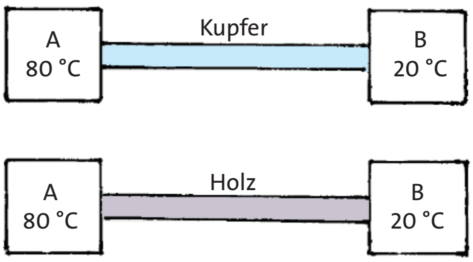


Abb. 10.22 Durch die Leitung aus Kupfer fließt ein stärkerer Entropiestrom als durch die Leitung aus Holz.

fläche haben. Außerdem liegt zwischen den Enden dieselbe Temperaturdifferenz. Trotzdem fließt durch b ein geringerer Entropiestrom als durch a, denn b ist aus Holz, a aber aus Kupfer.

> Jede Leitung setzt dem hindurchfließenden Entropiestrom einen Widerstand entgegen. Dieser Wärmewiderstand ist umso größer, je kleiner der Querschnitt der Leitung und je größer ihre Länge ist. Er hängt außerdem vom Material der Leitung ab.

Abb. 10.23 fasst die Abhängigkeiten von Entropiestromstärke und Wärmewiderstand noch einmal zusammen.

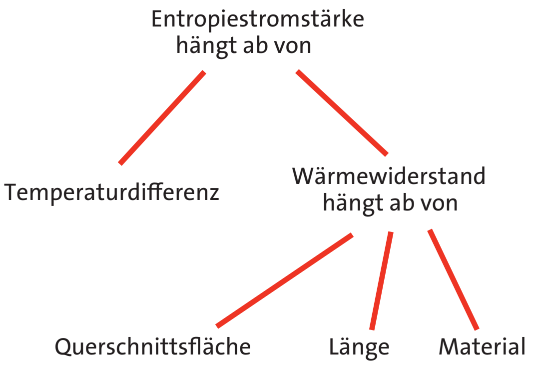


Abb. 10.23 Zusammenhang zwischen Stromstärke, Temperaturunterschied und Eigenschaften der Leitung

Wir untersuchen einige Materialien daraufhin, ob sie einen niedrigen oder einen hohen Wärmewiderstand haben, ob sie gute oder schlechte Wärmeleiter sind. Wir halten einen kleinen Stab aus einem bestimmten Material am einen Ende mit den Fingern fest und halten das andere Ende in eine Flamme, Abb. 10.24. Je nach Wärmewiderstand des Materials spüren wir mit den Fingern mehr oder weniger schnell, dass es heiß wird.

Wir stellen fest, dass Holz, Glas und Plastik einen recht hohen Wärmewiderstand haben. Metalle dagegen haben einen geringen Wärmewiderstand, sie sind gute Wärmeleiter. Luft und andere Gase haben einen sehr hohen Wärmewiderstand. Deshalb benutzt man zur Wärmeisolation von Gebäuden Materialien, die viel Luft enthalten: Ziegelsteine mit Hohlräumen, Gasbe-

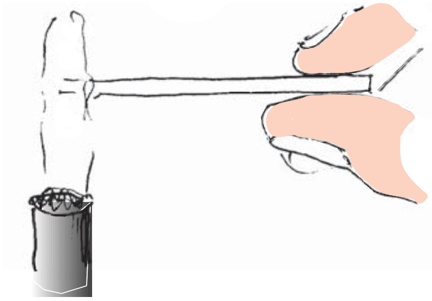


Abb. 10.24 Je nach Wärmewiderstand des Stäbchens wird es am rechten Ende mehr oder weniger schnell heiß.

tonsteine, aufgeschäumte Kunststoffe und Faserdämmstoffe. Aber auch ein Wollpullover hält deshalb so gut warm, weil die Wolle so viele (mit Luft gefüllte) Hohlräume enthält.

Wir können nun auch klären, warum sich ein metallener Gegenstand kälter anfühlt als ein hölzerner.

Wir wollen als Erstes feststellen, dass diese Beobachtung nur für niedrige Temperaturen zutrifft. Wir bringen ein Stück Holz und ein Stück Metall in kochendes Wasser, sodass beide Gegenstände eine Temperatur von 100 °C annehmen. Wir holen die Gegenstände aus dem Wasser heraus und berühren sie mit den Fingern. Diesmal fühlt sich der metallene Gegenstand heißer an als der hölzerne. Wie lässt sich das erklären?

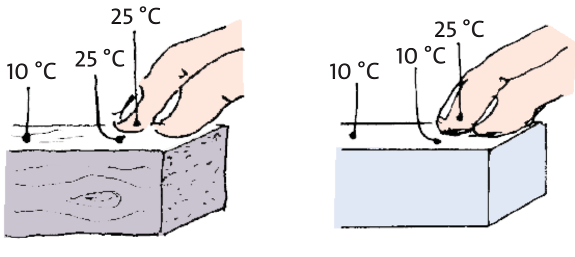


Abb. 10.25 Vor dem Berühren haben beide Gegenstände dieselbe Temperatur, danach nicht mehr.

Berührt man ein Stück Holz und ein Stück Metall, die beide eine Temperatur von 10 °C haben, mit den 25 °C warmen Fingern, so fließt zunächst Entropie von den Fingern zum Gegenstand, Abb. 10.25. Das Holz wird nun an der Berührungsstelle schnell warm, es nimmt die Temperatur der Finger an, denn es kann die Entropie nur schlecht fortleiten. Im Metall dagegen fließt die Entropie von der Berührungsstelle weg ins Innere des Gegenstandes und die Berührungsstelle erwärmt sich nur wenig.

Bei einem schlecht leitenden Gegenstand fühlt man also mit den Fingern gar nicht die Temperatur, die der Gegenstand vor der Berührung hatte, sondern die Temperatur, die der Gegenstand durch die Berührung annimmt.

Aufgaben

1. Wie muss ein Haus gebaut sein, damit der Wärmeverlust (Entropieverlust) möglichst gering ist?
2. Bei einem Heizkörper der Zentralheizung soll die Entropie möglichst leicht vom Wasser im Innern des Heizkörpers nach außen gelangen. Durch welche Maßnahmen wird das erreicht? Nenne andere Gegenstände, bei denen man an einer guten Wärmeleitung interessiert ist.

10.8 Entropietransport durch Konvektion

Ein Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom. Wenn man Entropie von einer Stelle A zu einer anderen Stelle B bringen will, genügt es, dafür zu sorgen, dass A eine höhere Temperatur hat als B. Man nennt diese Art des Entropietransports Wärmeleitung. Es ist sozusagen die normale Art, Entropie von A nach B zu bringen.

Beobachtet man seine Umwelt gut, so kann man aber feststellen, dass die meisten Entropietransporte, und vor allem Entropietransporte über große Entfernungen, gar nicht auf diese Art zustande kommen. Es gibt nämlich noch eine andere Methode der Entropieübertragung, den konvektiven Entropietransport oder die Konvektion.

Man erhitzt eine Flüssigkeit oder ein Gas und befördert diese Flüssigkeit bzw. dieses Gas von A nach B — etwa mithilfe einer Pumpe. Die Entropie wird dann von dem bewegten Stoff einfach mitgenommen. Man braucht hier keinen Temperaturunterschied als Antrieb; dafür muss es aber einen Antrieb für den Flüssigkeits- bzw. Gasstrom geben.

Ein Beispiel für einen konvektiven Entropietransport ist die Zentralheizung, Abb. 10.26. Im

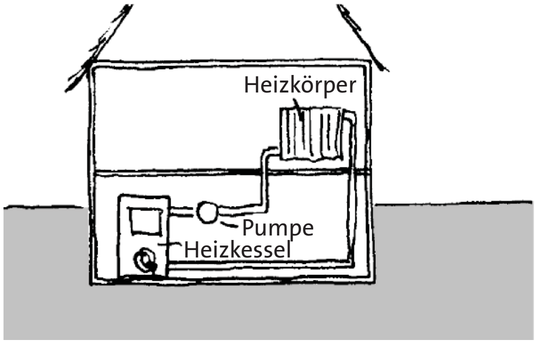


Abb. 10.26 Zentralheizung. Die Entropie gelangt konvektiv vom Heizkessel zu den Heizkörpern.

Heizkessel, der meist im Keller des Hauses steht, wird Wasser erwärmt, zum Beispiel durch Verbrennen von Heizöl. Das warme Wasser wird durch Rohre zu den Heizkörpern in den verschiedenen Räumen des Hauses gepumpt. In den Heizkörpern gibt es einen Teil seiner Entropie ab und fließt dann über eine Rückleitung zurück zum Heizkessel.

Konvektive Entropietransporte sind viel leichter zu realisieren als gewöhnliche, d. h. durch Temperaturdifferenzen angetriebene. Der Grund hierfür: Es gibt keine wirklich guten Wärmeleiter. Selbst der relativ gute Wärmeleiter Kupfer ist im Grunde noch ein sehr schlechter Wärmeleiter. Es wäre zum Beispiel unmöglich, die Entropie aus dem Heizungskeller der Zentralheizung mit Kupferstäben in die einzelnen Räume des Hauses zu befördern. Es ist dagegen überhaupt kein Problem, Wasser oder Luft, zusammen mit seiner Entropie, über große Entfernungen zu transportieren.

Konvektiver Entropietransport
- Die Entropie wird von einer strömenden Flüssigkeit oder einem strömenden Gas mitgenommen. Für einen konvektiven Entropietransport wird kein Temperaturunterschied gebraucht.

Für konvektive Entropieströme gibt es viele Beispiele in Natur und Technik.

In einem geheizten Zimmer soll sich die Entropie vom Heizkörper oder Ofen aus im ganzen Raum verteilen. Wie kann sie das? Luft ist doch ein sehr schlechter Wärmeleiter. Sie wird konvektiv mit der Luft transportiert. Hier bewegt sich die

Luft übrigens ohne Pumpe. Am Heizkörper bzw. Ofen steigt die Luft nach oben, da warme Luft eine geringere Dichte hat als kalte, Abb. 10.27.

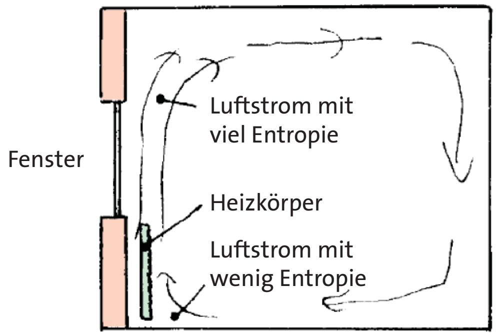


Abb. 10.27 Die Entropie wird durch Konvektion im Raum verteilt.

Jeder Automotor muss gekühlt werden, vom Motor muss Entropie weggebracht werden, Abb. 10.28. Die meisten Automotoren sind wassergekühlt: Die Entropie wird, wie bei der Zentralheizung, mit Wasser vom Motor zum „Kühler" transportiert. Für den Umlauf des Wassers sorgt die Kühlwasserpumpe. Im Kühler wird die Entropie an die vorbeistreichende Luft abgegeben.

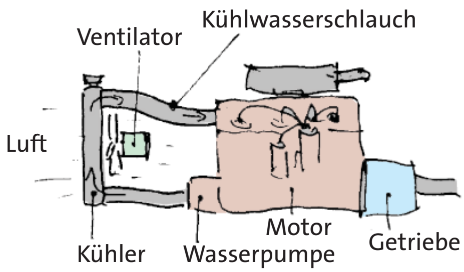


Abb. 10.28 Kühlung des Automotors. Die Entropie geht konvektiv vom Motor zum Kühler.

Auch alle großen Entropietransporte in der Natur, die unser Wetter bestimmen, sind konvektive Transporte. In der Atmosphäre wird Entropie mit dem Wind, also mit bewegter Luft, über sehr große Entfernungen transportiert.

Ein anderes interessantes Beispiel einer konvektiven Entropieübertragung bildet der Golfstrom. Er bringt Entropie von der Karibik nach Europa, Abb. 10.29. Das hat zur Folge, dass das Klima Europas milder ist, als es allein aufgrund seiner geographischen Breite zu erwarten wäre.

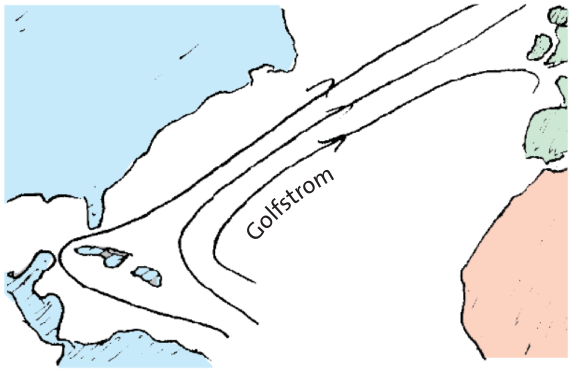


Abb. 10.29 Der Golfstrom. Entropie wird mit einer Wasserströmung von der Karibik nach Europa gebracht.

Wir wollen den Entropietransport durch Wärmeleitung dem konvektiven Transport noch einmal gegenüberstellen, indem wir den Weg der Entropie in einem Haus mit Zentralheizung verfolgen. Im Heizkessel gelangt die in den Flammen erzeugte Entropie konvektiv zur Außenwand des Wasserbehälters. Durch diese Wand hindurch geht sie auf normale Art, also von einem Temperaturunterschied angetrieben. Dann fließt sie mit dem Wasser konvektiv zu den Heizkörpern. Durch die Heizkörperwand muss sie wieder auf gewöhnliche Art fließen. Von der äußeren Oberfläche des Heizkörpers kommt sie schließlich mit der Luft konvektiv zu den verschiedenen Stellen des Raumes. Man sieht also, dass auf dem langen Weg von den Flammen des Heizkessels in das zu heizende Zimmer nur winzige Strecken, nur einige Millimeter, durch gewöhnliche Wärmeleitung überbrückt werden.

> Alle Entropietransporte über große Entfernungen sind konvektiv.

Aufgaben

1. Beschreibe, auf welchen Wegen ein Haus Wärme verliert. Welche Verluste beruhen auf Wärmeleitung, welche auf Konvektion?
2. Beschreibe den Weg der Entropie vom Innern eines Automotors bis zur Umgebungsluft. Auf welchen Teilen des Weges fließt die Entropie aufgrund einer Temperaturdifferenz, auf welchen Teilen fließt sie konvektiv?
3. Wie funktioniert die Autoheizung? Beschreibe den Weg der Entropie.

11 ENTROPIE UND ENERGIE

11.1 Die Entropie als Energieträger

Wir wollen Bilanzen für eine Elektroheizung machen. Mit Elektroheizung ist nichts weiter gemeint als ein Draht, durch den Elektrizität fließt, und der dadurch warm wird. Solche Heizungen haben, wie du weißt, viele Anwendungen: Kochplatte, Bügeleisen, Glühlampe …

Wir wissen einerseits, dass in der Heizung Entropie erzeugt wird. Während sie läuft, gibt die Heizung Entropie ab. Andererseits wissen wir, dass die Heizung Energie „verbraucht“, d.h., dass Energie über das Anschlusskabel in die Heizung hineinfließt. Der Träger für die hineinfließende Energie ist die Elektrizität.

Nun muss aber diese Energie, die ständig mit der Elektrizität in das Gerät hineingeht, wieder herauskommen. Und, wie schon oft, stellen wir auch hier die Frage: Welchen Träger hat diese Energie?

Die Antwort ist naheliegend. Es kommt ja neben der Energie ebenfalls Entropie aus der Heizung heraus, und diese Entropie ist der gesuchte Träger. Wir können verallgemeinern: Immer wenn irgendwo ein Entropiestrom fließt, fließt dort auch ein Energiestrom.

Entropie ist ein Energieträger.

Die Elektroheizung gehört zu den Geräten, die wir früher Energieumlader genannt hatten. Die Energie geht mit dem Träger Elektrizität in das Gerät hinein. Im Gerät wird Entropie erzeugt, und die Energie verlässt das Gerät mit dieser erzeugten Entropie. Sie wird also von Elektrizität auf Entropie umgeladen. Abb. 11.1 zeigt unsere Heizung schematisch.

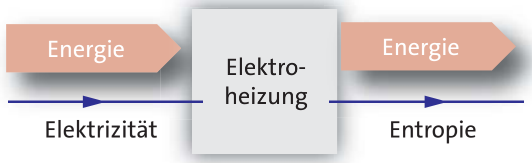


Abb. 11.1 Energieflussbild der Elektroheizung

In einem Punkt ist das Flussdiagramm noch nicht vollständig. Der Träger der hineinfließenden Energie, die Elektrizität, muss wieder aus dem Gerät herauskommen, denn Elektrizität kann weder erzeugt noch vernichtet werden. In Abb. 11.2 hat daher die Elektrizität außer einem Eingang noch einen Ausgang. Beachte, dass Energie und Elektrizität sowohl einen Eingang als auch einen Ausgang haben, während die Entropie nur einen Ausgang hat. Wir können das so formulieren: In der Elektroheizung wird die Energie auf neu erzeugte Entropie umgeladen.

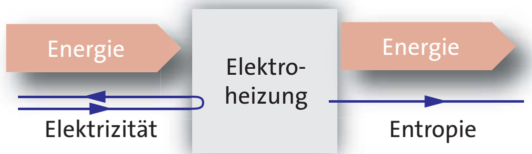


Abb. 11.2 Vervollständigtes Energieflussbild der Elektroheizung

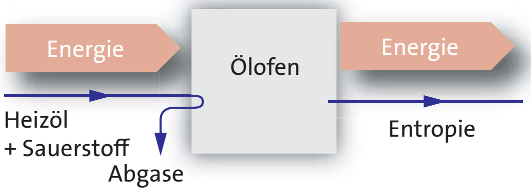


Abb. 11.3 Energieflussbild des Ölofens

Die Ergebnisse dieser Überlegungen lassen sich auf andere Vorgänge übertragen, bei denen Entropie erzeugt wird. Abb. 11.3 zeigt das Flussbild eines Ölofens. In den Ofen fließt die Energie mit dem Träger „Heizöl + Sauerstoff" hinein. Beim Abladen der Energie verwandeln sich Heizöl und Sauerstoff in Abgase (Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid). Bei der Verbrennung wird Entropie erzeugt, und die Energie verlässt den Ofen mit dieser Entropie.

Aufgaben

1. Zeichne das Energieflussbild für den Reibungsvorgang, der in Abb. 11.4 dargestellt ist. Der „Energieumlader" ist hier die reibende Unterseite der Kiste.
2. Ein Bauklotzturm stürzt ein. In welchem Teil dieses Vorgangs wird Entropie erzeugt? Woher kommt die dazu nötige Energie?

Abb. 11.4 Zu Aufgabe 1. An der Unterseite der Kiste wird Entropie erzeugt.

11.2 Der Zusammenhang zwischen Energiestrom und Entropiestrom

Jeder Entropiestrom ist von einem Energiestrom begleitet. Wie hängen die Stromstärken dieser beiden Ströme zusammen? Eine Teilantwort auf diese Frage lässt sich leicht geben: Ein starker Entropiestrom wird mit einem starken Energiestrom verknüpft sein. Das lässt sich noch genauer sagen: Zwei gleich starke Entropieströme tragen doppelt so viel Energie wie einer davon. Mathematisch ausgedrückt:

$$P \sim I_S. \qquad (11.1)$$

Das ist noch nicht die komplette Beziehung zwischen P und I_S. Um den fehlenden Teil zu finden, betrachten wir wieder Bilanzen, allerdings jetzt für ein anderes Gerät als für die Elektroheizung. Für unser augenblickliches Ziel eignet sich eine elektrische Wärmepumpe besser.

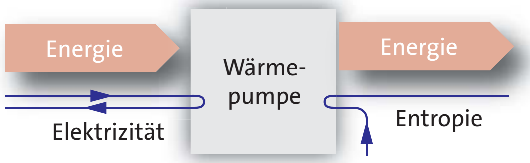


Abb. 11.5 Energieflussbild der Wärmepumpe

Abb. 11.5 zeigt das Flussbild dieses Energieumladers. Diesmal gibt es zu jedem der herausfließenden Ströme einen gleich starken hineinfließenden, also auch zum Entropiestrom. Die Energie kommt wieder mit dem Träger Elektrizität in das Gerät hinein. Die Elektrizität verlässt die Wärmepumpe, nachdem sie ihre Energie abgeladen hat. Andererseits fließt in die Wärmepumpe Entropie hinein, und darauf wird die von der Elektrizität kommende Energie aufgeladen. Diese Energie verlässt die Pumpe mit der herausfließenden Entropie.

Wir wollen uns die rechte Seite des Flussdiagramms genauer ansehen. Der rechte Energiepfeil stellt nur die Energie dar, die von der Elektrizität übernommen wurde. Wir können die rechte Seite des Diagramms genauer darstellen, nämlich so, wie es Abb. 11.6 zeigt. Auch die in die Wärmepumpe hineinfließende Entropie trägt Energie. Die herausfließende Entropie trägt aber mehr Energie als die hineinfließende, nämlich zusätzlich die von der Elektrizität übernommene. In Abb. 11.5 ist also nur der „Nettoenergiestrom" dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen Energiestrom und Entropiestrom

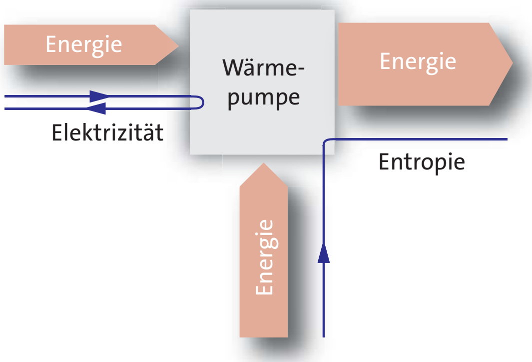


Abb. 11.6 Wärmepumpe. Die Energieströme, die mit der Entropie fließen, sind einzeln dargestellt.

Wir sehen in Abb. 11.6, dass zwei Entropieströme derselben Stärke verschieden viel Energie tragen können. Der hineinfließende trägt wenig Energie, der herausfließende viel. Die Energiestromstärke hängt also nicht allein von der Entropiestromstärke ab.

Worin unterscheidet sich aber der Entropieeingang vom Entropieausgang? In der Temperatur. Die Energiestromstärke muss noch von der Temperatur des Leiters, durch den die Entropie fließt, abhängen. Wir können sagen: Der Proportionalitätsfaktor, der die Beziehung (11.1) zu einer Gleichung macht, hängt von der Temperatur ab. Damit haben wir den Sachverhalt allerdings unnötig kompliziert ausgedrückt. Tatsächlich ist der Proportionalitätsfaktor einfach die absolute Temperatur selbst:

$$P = T \cdot I_S . \qquad (11.2)$$

Ein Zufall? Ganz und gar nicht. Die Temperaturskala, die jeder benutzt, und mit der wir schon so viel zu tun hatten, ist nämlich über Gleichung (11.2) definiert.

Ein Entropiestrom der Stärke I_S trägt einen Energiestrom der Stärke $T \cdot I_S$.

Gleichung (11.2) zeigt, dass man die Temperatur auch folgendermaßen interpretieren kann:

Die Temperatur gibt an, wie stark ein Entropiestrom mit Energie beladen ist.

Wir können nun eine genaue, quantitative Energiebilanz der Wärmepumpe aufstellen. Wir nennen die hohe Temperatur, auf der die Entropie aus der Maschine herauskommt, T_A und die niedrige, auf der die Entropie hineingeht, T_B. Mit der Entropie auf niedriger Temperatur geht dann ein Energiestrom der Stärke

$$P_B = T_B \cdot I_S$$

hinein. Zum Ausgang (auf hoher Temperatur) kommt ein Energiestrom der Stärke

$$P_A = T_A \cdot I_S$$

heraus. Die Nettoenergiestromstärke ergibt sich zu

$$P = P_A - P_B = T_A \cdot I_S - T_B \cdot I_S .$$

Es ist also

$$P = (T_A - T_B) \cdot I_S . \qquad (11.3)$$

Dieser Nettostrom muss genauso stark sein wie der Energiestrom, der über das Netzkabel in die Wärmepumpe hineinfließt. Gleichung (11.3) gibt also den Energieverbrauch der Wärmepumpe an. Wir interpretieren Gleichung (11.3) so:

Die Wärmepumpe verbraucht umso mehr Energie,
- je mehr Entropie sie fördern muss,
- je größer der Temperaturunterschied ist, den sie zu überwinden hat.

Beispiel

Eine Wärmepumpe, mit der ein Haus geheizt wird, befördert pro Sekunde 30 Ct von draußen in das Haus hinein. Die Außentemperatur beträgt 10 °C, die Temperatur im Haus 22 °C. Wie hoch ist der Energieverbrauch der Pumpe?

Wir brauchen die Celsiustemperaturwerte hier gar nicht in absolute Werte umzurechnen, da Differenzen auf beiden Skalen gleich sind. Es ist

$$T_A - T_B = 12\ \mathrm{K}.$$

Wir erhalten daher

$$P = (T_A - T_B) \cdot I_S = 12\ \text{K} \cdot 30\ \text{Ct/s} = 360\ \text{W}.$$

Wir wollen nun annehmen, dasselbe Haus werde mit einer gewöhnlichen Elektroheizung geheizt, d. h., die Entropie werde nicht von draußen hineingepumpt, sondern im Haus erzeugt. Natürlich soll die Temperatur im Haus wieder 22 °C betragen, und natürlich brauchen wir im Haus wieder 30 Ct/s, denn genauso viel verliert das Haus durch die Wände. Die Stärke des Energiestroms, der aus der Elektroheizung kommt, berechnen wir mit Gleichung (11.2). Mit I_S = 30 Ct/s und T = (273 + 22)K = 295 K wird:

$$P = T \cdot I_S = 295\ \text{K} \cdot 30\ \text{Ct/s} = 8850\ \text{W}.$$

Der Energieverbrauch der gewöhnlichen Elektroheizung ist nach unserer Rechnung sehr viel größer als der der Wärmepumpe. Praktisch ist der Unterschied allerdings doch nicht so groß, da auch in jeder Wärmepumpe etwas Entropie erzeugt wird

Aufgaben

1. Ein Haus, das mit einer Ölheizung auf eine Temperatur von 20 °C geheizt wird, hat einen Wärmeverlust von 35 Ct/s. Wie hoch ist der Energieverbrauch der Heizung?
2. Der Kühler eines Autos, dessen Temperatur 90 °C beträgt, gibt pro Sekunde 60 Carnot an die Luft ab. Wie groß ist der Energiestrom, der aus dem Kühler in die Luft fließt?
3. Die Temperatur an der Unterseite eines 1000-W-Bügeleisens beträgt 300 °C. Wie viel Entropie kommt pro Sekunde aus dem Bügeleisen?
4. Ein Schwimmbad wird mit einer Wärmepumpe geheizt. Die Wärmepumpe nimmt die Entropie aus einem vorbeifließenden Bach. Die Temperatur des Wassers im Bach ist 15 °C, die des Wassers im Schwimmbad 25 °C. Das Wasser im Schwimmbecken verliert ständig Entropie an die Umgebung, und zwar pro Sekunde 500 Ct. Damit es seine Temperatur behält, muss die Wärmepumpe diese Entropie ständig nachliefern. Wie hoch ist der Energieverbrauch der Wärmepumpe?
5. (a) Ein Haus wird mit einer Wärmepumpe geheizt. Die Außentemperatur beträgt 0 °C, die Temperatur im Haus 25 °C. Die Wärmepumpe fördert 30 Ct/s. Wie hoch ist ihr Energieverbrauch? (b) Dasselbe Haus wird mit einer gewöhnlichen Elektroheizung geheizt, d. h. die 30 Ct/s werden nicht von draußen hineingepumpt, sondern im Haus erzeugt. Wie hoch ist der Energieverbrauch?

11.3 Entropieerzeugung durch Entropieströme

Durch einen Stab aus einem Material, das die Wärme gut leitet, fließt ein Entropiestrom, Abb. 11.7. Der Strom wird durch einen Temperaturunterschied aufrechterhalten. Der Stab ist nach den Seiten hin wärmeisoliert, sodass dorthin keine Entropie verloren geht. Zu Beginn des Experiments wird sich die Temperatur an den verschiedenen Stellen des Stabes noch ändern. Nach einer Weile hören diese Änderungen aber auf: Es stellt sich ein Fließgleichgewicht ein.

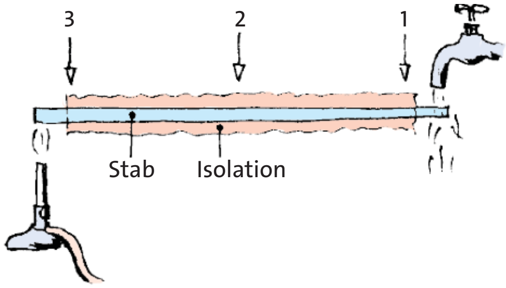


Abb. 11.7 Am rechten Ende des Stabes kommt mehr Entropie heraus als links hineingeflossen ist.

Die Gleichung, die Entropie- und Energiestromstärke miteinander verknüpft, macht über dieses einfache Experiment eine überraschende Aussage.

Wir betrachten drei verschiedene Stellen des Stabes: das rechte, kalte Ende, die Mitte und das linke, heiße Ende. Die Werte von Größen, die sich auf diese drei Stellen beziehen, kennzeichnen wir durch eine „1“, eine „2“ bzw. eine „3“. Links fließt ein Energiestrom der Stärke P_3 in den Stab hinein. Da sich das Fließgleichgewicht eingestellt hat, häuft sich nirgends Energie an, und der Energiestrom muss an jeder Stelle des Stabes dieselbe Stärke haben:

$$P_3 = P_2 = P_1 . \qquad (11.4)$$

Nun wissen wir, dass die Energiestromstärke P mit der Entropiestromstärke I_S gemäß

$$P = T \cdot I_S \qquad (11.5)$$

zusammenhängt. Wir ersetzen die Energiestromstärken in Gleichung (11.4) mithilfe von Gleichung (11.5) und erhalten:

$$T_3 \cdot I_{S3} = T_2 \cdot I_{S2} = T_1 \cdot I_{S1}\,. \qquad (11.6)$$

Wir wissen nun, dass die Temperatur T_3 größer ist als T_2 und T_2 größer ist als T_1:

$$T_3 > T_2 > T_1\,.$$

Damit Gleichung (11.6) gelten kann, muss

$$I_{S3} < I_{S2} < I_{S1}\,.$$

sein: Der Entropiestrom wird nach rechts immer stärker. Rechts, beim Kühlwasser, kommt mehr Entropie aus dem Stab heraus, als links, bei der Flamme, hineingegangen ist. Demnach muss im Stab Entropie erzeugt worden sein. Wie ist das möglich?

Im Grunde ist dieses Ergebnis gar nicht so überraschend, wie es zunächst vielleicht aussieht. Wir hatten früher festgestellt, dass Entropie immer dann erzeugt wird, wenn irgendeine Art Reibungsvorgang abläuft, wenn ein Strom gegen einen Widerstand anströmt. Und genau das ist auch hier der Fall. Was hier strömt, ist allerdings keine Flüssigkeit und kein Gas, und es ist kein Impuls und keine Elektrizität, sondern die Entropie selbst. Auch beim Strömen von Entropie durch einen Widerstand wird also Entropie erzeugt.

Wir können die Entropie am Ausgang des Stabes, d.h. am rechten Ende, in Gedanken in zwei Anteile zerlegen: den Anteil, der links hineingeflossen ist und den, der auf dem Weg von links nach rechts neu entstanden ist. Es ist also

$$I_{S1} = I_{S3} + I_{S\,\text{erzeugt}}$$

$I_{S\,\text{erzeugt}}$ stellt die pro Sekunde im Stab erzeugte Entropiemenge dar.

> Fließt Entropie durch einen Wärmewiderstand, so wird zusätzliche Entropie erzeugt.

Beispiel

Der Heizdraht des 700-W-Tauchsieders (Abb. 11.8) befindet sich auf 1 000 K (727 °C).

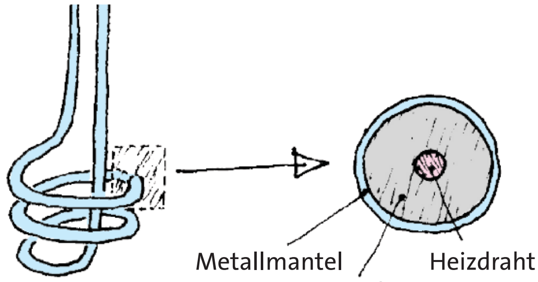


Abb. 11.8 Tauchsieder. Rechts im Querschnitt (vereinfacht und vergrößert)

Der Entropiestrom, der aus dem Draht austritt, hat eine Stärke von

$$I_S = \frac{P}{T} = \frac{700\ \text{W}}{1000\ \text{K}} = 0{,}7\ \text{Ct/s}.$$

An seiner äußeren Oberfläche hat der Tauchsieder dieselbe Temperatur wie das Wasser. Wir nehmen an, die Wassertemperatur betrage 350 K (77 °C). Daher ist die Entropiestromstärke an der Tauchsiederaußenwand:

$$I_S = \frac{P}{T} = \frac{700\ \text{W}}{350\ \text{K}} = 2\ \text{Ct/s}.$$

Auf dem kurzen Weg vom Heizdraht zur Außenseite des Tauchsieders werden also

$$(2 - 0{,}7)\ \text{Ct/s} = 1{,}3\ \text{Ct/s}$$

erzeugt. Durch den elektrischen Strom werden im Draht 0,7 Ct/s erzeugt. Durch den Entropiestrom nach draußen wird also mehr erzeugt als durch den elektrischen Strom.

Aufgaben

1. Ein Haus wird mit 20 kW geheizt. Die Innentemperatur ist 20 °C, die Außentemperatur –5 °C. (a) Wie stark ist der nach draußen fließende Entropiestrom an der Innenwand des Hauses? (b) Wie stark ist er an der Außenwand? (c) Wie viel neue Entropie wird pro Sekunde beim Herausfließen der Entropie erzeugt?
2. Der Heizdraht einer 1000-W-Kochplatte hat eine Temperatur von 1000 K. (a) Wie viel Entropie wird pro Sekunde im Heizdraht erzeugt? (b) Auf der Kochplatte steht ein Topf mit Wasser; die Wassertemperatur beträgt 373 K. Wie viel Entropie kommt pro Sekunde im Wasser an? (c) Wie viel Entropie wird auf dem Weg vom Heizdraht zum Wasser erzeugt?

11.4 Wärmemotoren

Was ein Wärmemotor ist, lässt sich am besten anhand seines Energieflussbildes erklären, Abb. 11.9: ein Energieumlader, der Energie mit dem Träger Entropie bekommt und sie mit dem Träger Drehimpuls wieder abgibt. Dass der Energieträger am Ausgang der Maschine Drehimpuls ist, bedeutet, dass die Energie über eine rotierende Welle herauskommt; die Maschine ist dazu da, etwas anzutreiben.

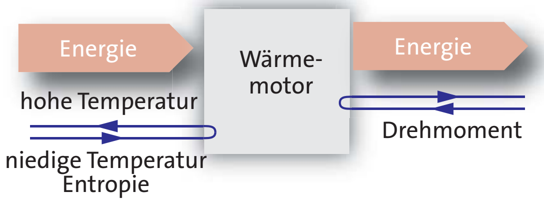


Abb. 11.9 Energieflussbild eines Wärmemotors

Zur Klasse der Wärmemotoren gehören:

- die Dampfturbine;
- die Kolbendampfmaschine;
- Verbrennungsmotoren (Otto- und Dieselmotoren);
- Strahltriebwerke;
- andere, weniger verbreitete Maschinen.

Wie diese Maschinen im Einzelnen funktionieren, werden wir später sehen. Im Augenblick betrachten wir nur das allen Wärmemotoren Gemeinsame. Dazu beginnen wir mit einem kleinen Umweg.

Abb. 11.10 zeigt das Energieflussbild einer Wasserturbine, also von einem Gerät, das kein Wärmemotor ist. In die Wasserturbine fließt Wasser auf hohem Druck hinein, und es fließt auf niedrigem Druck wieder heraus. Das Wasser mit dem hohen Druck trägt viel Energie, das mit dem niedrigen wenig. Während das Wasser in der Turbine vom hohen auf den niedrigen Druck „heruntergeht", lädt es Energie ab. Diese Energie verlässt die Turbine über die Welle mit dem Energieträger Drehimpuls.

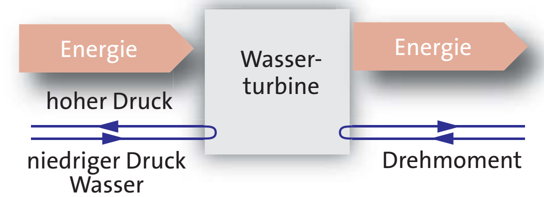


Abb. 11.10 Energieflussbild einer Wasserturbine

Ein Vergleich von Abb. 11.10 mit Abb. 11.9 zeigt, dass der Wärmemotor mit der Wasserturbine etwas Wesentliches gemeinsam hat. Im Wärmemotor fließt Entropie auf hoher Temperatur hinein, d. h. Entropie, die viel Energie trägt. Dieselbe Entropie fließt auf niedriger Temperatur, d. h. mit wenig Energie, wieder aus der Maschine heraus. Während die Entropie in der Maschine von der hohen auf die niedrige Temperatur „heruntergeht", lädt sie Energie ab, und auch diese Energie kommt über eine rotierende Welle, d. h. mit dem Träger Drehimpuls, heraus.

> In einem Wärmemotor wird Energie vom Energieträger Entropie auf den Energieträger Drehimpuls umgeladen.

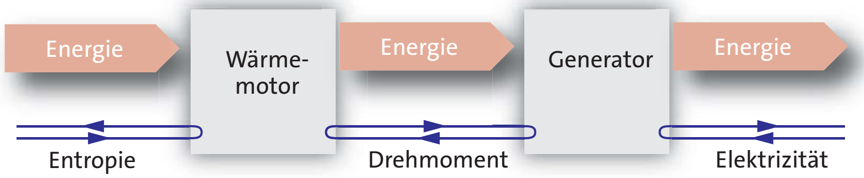
Wir berechnen die Energie, die ein Wärmemotor pro Sekunde abgibt. Die Maschine nimmt am Entropieeingang auf der hohen Temperatur T_A einen Energiestrom der Stärke $T_A \cdot I_S$ auf und gibt am Entropieausgang auf der niedrigen Temperatur T_B einen Energiestrom der Stärke $T_B \cdot I_S$ ab. Die Differenz ist die Stromstärke derjenigen Energie, die auf den Drehimpuls umgeladen wird. Mit dem Drehimpuls verlässt also die Maschine ein Energiestrom der Stärke

$$P = T_A \cdot I_S - T_B \cdot I_S = (T_A - T_B) \cdot I_S$$

> Ein Wärmemotor gibt mit dem Drehimpuls umso mehr Energie ab,
> - je stärker der Entropiestrom ist, der durch die Maschine fließt;
> - je größer das Temperaturgefälle ist, das der Entropiestrom in der Maschine hinuntergeht.

In den meisten Elektrizitätswerken treibt man den Generator mit einem Wärmemotor an. Das Flussbild der beiden zusammenhängenden Maschinen zeigt Abb. 11.11.

Abb. 11.11 Energieflussbild eines Wärmekraftwerks



Man kann die beiden Energieumlader symbolisch durch einen einzigen Kasten darstellen, Abb. 11.12. Vergleiche dieses Flussbild mit dem einer elektrischen Wärmepumpe, das in Abb. 11.13 noch einmal dargestellt ist. (Es ist dasselbe wie in Abb. 11.5.) Die Flussbilder unterscheiden sich nur in der Richtung der Pfeile.

Abb. 11.12 Energieflussbild eines Wärmekraftwerks. Turbine und Generator sind durch ein einziges Symbol dargestellt.

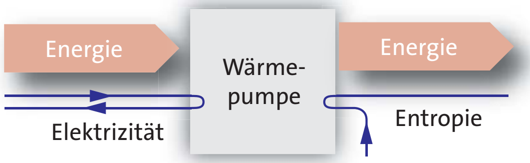


Abb. 11.13 Energieflussbild der Wärmepumpe

Das Kraftwerk tut demnach gerade das Umgekehrte von dem, was eine Wärmepumpe tut. Während die elektrische Wärmepumpe Energie vom Träger Elektrizität auf den Träger Entropie umlädt, wird in dem Kraftwerk von Abb. 11.12 die Energie von Entropie auf Elektrizität umgeladen.

Ein Wärmekraftwerk lädt Energie von Entropie auf Elektrizität um. Ein solches Kraftwerk ist eine komplizierte und sehr große Anlage. Es gibt Geräte, die genau dasselbe tun, nämlich Energie von Entropie auf Elektrizität umladen, die aber sehr klein und handlich und gleichzeitig robust sind, die Peltiermodule.

Und ein Peltiermodul lässt sich sogar umgekehrt betreiben: als Wärmepumpe. Es stellt also gleichzeitig eine unkomplizierte, nicht zu teure, sehr kompakte Wärmepumpe dar.

Leider haben Peltierelemente hohe Energieverluste. Sie sind daher nur für solche Anwendungen geeignet, bei denen Verluste keine große Rolle spielen.

11.5 Entropiequellen für Wärmemotoren

Will man einen Wärmemotor betreiben, so treten immer zwei Probleme auf:

- Man braucht eine Quelle für Entropie auf hoher Temperatur.
- Man braucht eine Möglichkeit, die Entropie auf niedriger Temperatur wieder loszuwerden, eine „Mülldeponie für Entropie“ sozusagen.

Diese Probleme kann man auf verschiedene Arten lösen.

Natürliche Entropiequellen

Die Lösung, die unserer Umwelt am wenigsten schadet: Man nutzt natürliche Quellen von Entropie auf hoher Temperatur.

Es gibt einige Stellen auf der Erde, wo in Gesteinsschichten in nicht zu großer Tiefe heißer Dampf eingeschlossen ist. Man lässt ihn über Bohrlöcher an die Erdoberfläche strömen und betreibt mit ihm ein Kraftwerk. Leider sind solche Vorkommen geothermischer Energie nicht sehr häufig.

Eine andere Möglichkeit: Mit dem Sonnenlicht bekommt die Erde riesige Entropiemengen auf sehr hoher Temperatur. Diese Entropie wird bereits in einigen Solarkraftwerken ausgenutzt. Obwohl diese Entropiequelle unerschöpflich ist, stellt sie uns vor einige nicht leicht lösbare Probleme. Zum einen ist das Sonnenlicht sehr weit verteilt, die Entropie, und mit ihr die Energie, ist sehr stark verdünnt, und man muss sie von sehr großen von der Sonne beschienenen Flächen „aufsammeln". Dieses Aufsammeln kann man so bewerkstelligen, dass man Spiegel aufstellt und damit das Licht auf einen Dampfkessel konzentriert. Ein zweites Problem im Zusammenhang mit der Sonnenenergie besteht darin, dass die Sonne nicht immer scheint: nachts gar nicht und im Winter, d. h. gerade dann, wenn man die meiste Energie braucht, scheint sie nur schwach.

Künstliche Entropiequellen

Den weitaus größten Teil der Entropie, die heute zum Betreiben von Wärmemotoren eingesetzt wird, beschafft man sich auf eine weniger elegante Art: Man erzeugt sie durch Verbrennen von Brennstoffen oder Treibstoffen oder durch Kernspaltung.

Da Wärmemotoren in sehr großem Umfang eingesetzt werden, stellt nicht nur die Entropiebeschaffung ein Problem dar, sondern auch der „thermische Müll". Wir wollen sehen, wie diese Probleme für die wichtigsten Wärmemotoren gelöst werden.

Wärmekraftwerke

Die meisten Kraftwerke arbeiten mit Dampfturbinen. In Kohlekraftwerken wird die Entropie durch Verbrennung von Kohle im Dampfkessel erzeugt. In Kernkraftwerken erzeugt man sie im Kernreaktor durch Spaltung der Atomkerne von Uran und Plutonium.

Wenn die Entropie das Kraftwerk verlässt, ist die Temperatur nur wenig höher als die Umgebungstemperatur. Die Entropie wird meist an das Wasser eines großen Flusses abgegeben. Ist kein Fluss vorhanden oder reicht das Flusswasser nicht aus, so wird sie in Kühltürmen an die Luft abgegeben.

Verbrennungsmotoren

Die Entropie wird durch Verbrennung des Treibstoffs — Benzin oder Dieselöl — im Innern des Motors erzeugt. Sie verlässt den Motor zum größten Teil mit den Abgasen. Das Flussbild von Abb. 11.9 trifft genau genommen auf den Verbrennungsmotor nicht zu, da dem Motor die Entropie nicht von außen zugeführt wird.

Kolbendampfmaschinen

Sie waren, bevor es Elektro- und Verbrennungsmotoren gab, die wichtigsten Antriebsmaschinen. Sie wurden eingesetzt in Dampflokomotiven und Dampfschiffen, in Dampfwalzen und Dampfpflügen, zum Antrieb von Dreschmaschinen und zum Antrieb der Maschinen in vielen Fabriken.

Auch hier wurde die Entropie im Dampfkessel durch Verbrennung von Kohle erzeugt. Der Dampf wurde, nachdem er die Maschine angetrieben hatte, meist einfach in die Luft abgelassen. Mit diesem Abdampf ging auch die Entropie in die Luft weg.

Strahltriebwerke

Sie dienen zum Antrieb aller großen Verkehrsflugzeuge. Es entspricht nicht ganz unserer Definition eines Wärmemotors: Es gibt die Energie nicht mit Drehimpuls über eine Welle ab, sondern mit dem Energieträger Impuls, Abb. 11.14. Es „pumpt" Impuls aus der Luft in das Flugzeug.

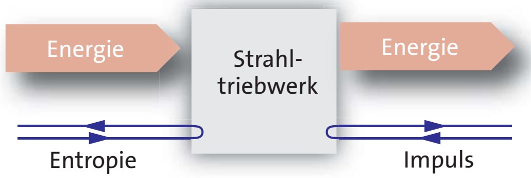


Abb. 11.14 Energieflussbild des Strahltriebwerks

Aufgaben

1. Durch einen Wärmemotor fließt ein Entropiestrom von 100 Ct/s. Die Temperatur am Eingang ist 150 °C, am Ausgang 50 °C. Wie viel Energie gibt der Motor pro Sekunde mit dem Energieträger Drehimpuls ab?
2. Ein Kraftwerk gibt mit der Elektrizität einen Energiestrom von 1000 MW ab. Die Temperatur des Dampfes am Eingang der Turbine beträgt 750 K, am Ausgang 310 K. Wie stark ist der Entropiestrom, der mit dem Kühlwasser wegfließt? Wie stark ist der Energiestrom, den dieser Entropiestrom trägt?
3. Überlege Möglichkeiten, wie man in der Natur vorkommende Entropie auf hoher Temperatur ausnutzen könnte. Diskutiere auch Möglichkeiten, die dir unrealistisch erscheinen.

11.6 Der Energieverlust

Auf dem Weg vom Wasserhahn zur Spritze, Abb. 11.15, geht Wasser verloren. Es kommen 2 Liter Wasser pro Sekunde zum Wasserhahn heraus, bei der Spritze kommen nur noch 1,8 Liter pro Sekunde an. Die Differenz, nämlich 0,2 Liter pro Sekunde, ist durch das Loch im Schlauch ausgetreten. Wir haben einen Verlust von 0,2 l/s.

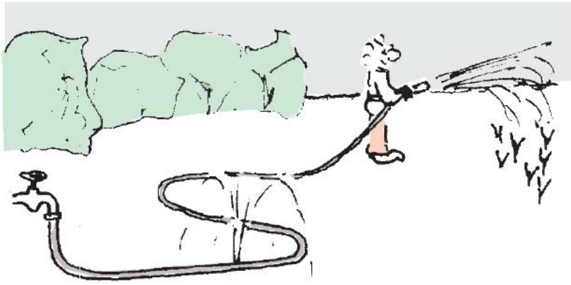


Abb. 11.15 Durch das Loch im Schlauch geht Wasser verloren.

$$V = \frac{0{,}2\ \text{l/s}}{2\ \text{l/s}} \cdot 100\ \% = 10\ \%.$$

In fast allen Geräten, die Energie auf einen anderen Träger umladen sollen, und in fast allen Leitungen, die der Energieübertragung dienen, geht Energie verloren. Was bedeutet das? Energie kann doch nicht vernichtet werden! Es ist ähnlich wie bei dem Wasser in Abb. 11.15: Ein Teil der Energie kommt nicht dort an, wo er ankommen soll, er geht sozusagen seitlich hinaus.

Energieverluste beruhen fast immer auf Entropieerzeugung. Wir betrachten eine Wasserturbine. Wir haben bisher das Flussbild einer Wasserturbine so gezeichnet wie es Abb. 11.16 zeigt (siehe auch Abb. 11.10). Tatsächlich ist dies aber eine perfekte, idealisierte Turbine, wie es sie in Wirklichkeit gar nicht gibt. Denn in jeder wirklichen Turbine wird unbeabsichtigt Entropie erzeugt, und zwar an verschiedenen Stellen: durch die Reibung des Wassers an den Rohrwänden, durch die Reibung des Wassers an sich selbst („innere Reibung“) und durch die Reibung in den Lagern der Turbinenwelle. Die erzeugte Entropie verlässt die Turbine auf verschiedenen Wegen: Sie geht zum Teil in das wegfließende Wasser, zum Teil in die Luft der Umgebung.

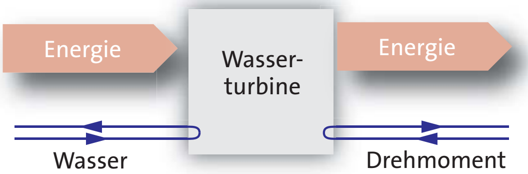


Abb. 11.16 Energieflussbild einer idealen Wasserturbine

Mit dieser Entropie geht nun auch Energie weg. Abb. 11.17 zeigt das Energieflussbild einer realen Turbine. Durch die Breite der Energiepfeile wird die Stärke der entsprechenden Ströme angedeutet.

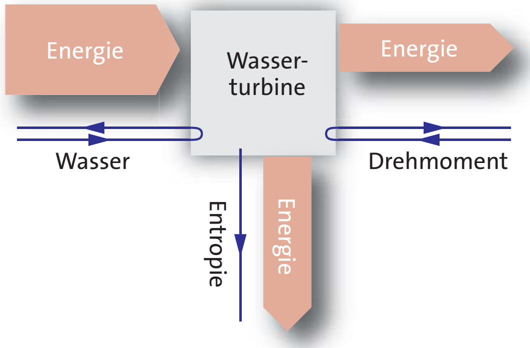


Abb. 11.17 Energieflussbild einer wirklichen Wasserturbine

Wir nennen die Stärke des Verlustenergiestroms P_V. Der Zusammenhang zwischen erzeugter Entropie und verlorener Energie ist dann

$$P_V = T \cdot I_{S\,\text{erzeugt}}$$

und der (prozentuale) Verlust der Maschine ist

$$V = \frac{P_V}{P_{\text{hinein}}} \cdot 100\ \%. \qquad (11.7)$$

Hier bedeutet P_{hinein} die Stärke des in die Maschine hineinfließenden Energiestroms.

Abb. 11.18 zeigt das Energieflussbild eines echten, nicht idealisierten Elektromotors. Auch hier wird unbeabsichtigt Entropie erzeugt. Ein Teil der Entropie entsteht in diesem Fall in den Drähten (immer, wenn ein elektrischer Strom durch einen Draht fließt, wird Entropie erzeugt), ein anderer Teil in den Lagern.

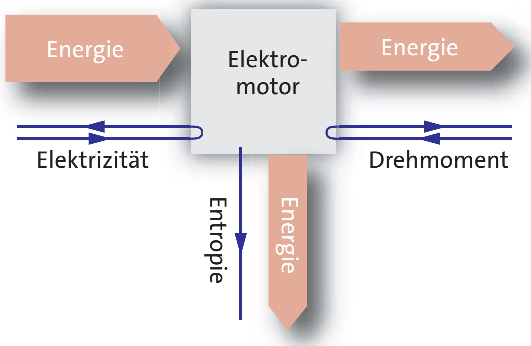


Abb. 11.18 Energieflussbild eines nicht idealisierten Elektromotors

Der Energieverlust in einem einfachen elektrischen Kabel berechnet sich ebenfalls nach Formel (11.7).

Wir haben gesehen, dass Energieverluste auf Entropieerzeugung beruhen. Man möchte Verluste natürlich vermeiden. Merke dir daher:

> Vermeide Entropieerzeugung.

Für manche Energieumlader sind die Verluste sehr groß. In Tab. 11.1 sind einige typische Werte aufgeführt.

	Verlust
Große Dampfturbine	10 %
Großer Elektromotor	10 %
Spielzeugelektromotor	40 %
Solarzelle	90 %
Kohlekraftwerk	57 %
Kernkraftwerk	67 %

Tab. 11.1 Typische Energieverlustwerte

Du wunderst dich vielleicht über die hohen Verluste bei Kraftwerken. Dies sind nur zum kleineren Teil die Verluste von Dampfturbine und Generator. Sie kommen vor allem daher, dass in der Feuerung bzw. im Reaktor Entropie erzeugt wird. Wie kann man aber hier von Verlusten sprechen? Müssen wir denn diese Entropie nicht erzeugen, damit das Kraftwerk überhaupt laufen kann? Nicht unbedingt.

Man könnte im Prinzip die Energie der Kohle (bzw. des Urans) direkt auf Elektrizität umladen, ohne den Umweg über Entropie und Drehimpuls. Geräte, die das machen, heißen Brennstoffzellen. Eine Brennstoffzelle funktioniert ähnlich wie eine Batterie. Sie stellt im Wesentlichen eine Batterie dar, bei der man den sich verbrauchenden Stoff ständig neu zuführt. Bisher arbeiten Brennstoffzellen allerdings nur mit sehr reinen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen, und nicht mit Kohle. Außerdem ist ihre Lebensdauer noch nicht groß genug, um mit den gewöhnlichen Kraftwerken konkurrieren zu können.

Aufgaben

1. Der Motor eines Autos gibt über die Motorwelle 20 kW ab. Bei den Rädern kommen nur noch 18 kW an, denn im Getriebe und in den Lagern wird Entropie erzeugt (Reibung). Wie groß ist der prozentuale Verlust?
2. Ein Elektromotor, dessen Verlust 40 % beträgt, verbraucht 10 W. Wie viel Energie gibt er pro Sekunde mit dem Drehimpuls ab? Wie viel Entropie erzeugt er pro Sekunde? (Die Umgebungstemperatur beträgt 300 K.)
3. Ein Generator, der einen Verlust von 8 % hat, gibt mit der Elektrizität einen Energiestrom der Stärke 46 kW ab. Wie stark ist der Energiestrom, der über die Welle in den Generator hineinfließt? Wie stark ist der Verlustenergiestrom? Wie stark ist der Strom der erzeugten Entropie? (Die Umgebungstemperatur beträgt 300 K.)

11.7 Der Zusammenhang zwischen Entropieinhalt und Temperatur

Führt man einem Körper Entropie zu, so wächst seine Temperatur. Wenigstens war es so bei den Gegenständen, mit denen wir es bisher zu tun hatten. (Wir werden später Fälle kennenlernen, in denen es anders ist.)

Wovon hängt es ab, wie stark sich ein Körper erwärmt, wenn man ihm eine bestimmte Menge Entropie zuführt?

Erstens natürlich von der Größe des Körpers, oder besser, von seiner Masse. Das können wir auch so ausdrücken: Zwei Körper A und B sollen aus demselben Material bestehen. A habe aber eine doppelt so große Masse wie B. Bei gleicher Temperatur enthält A doppelt so viel Entropie wie B.

Zweitens hängt der Entropieinhalt davon ab, aus welchem Material der Gegenstand besteht.

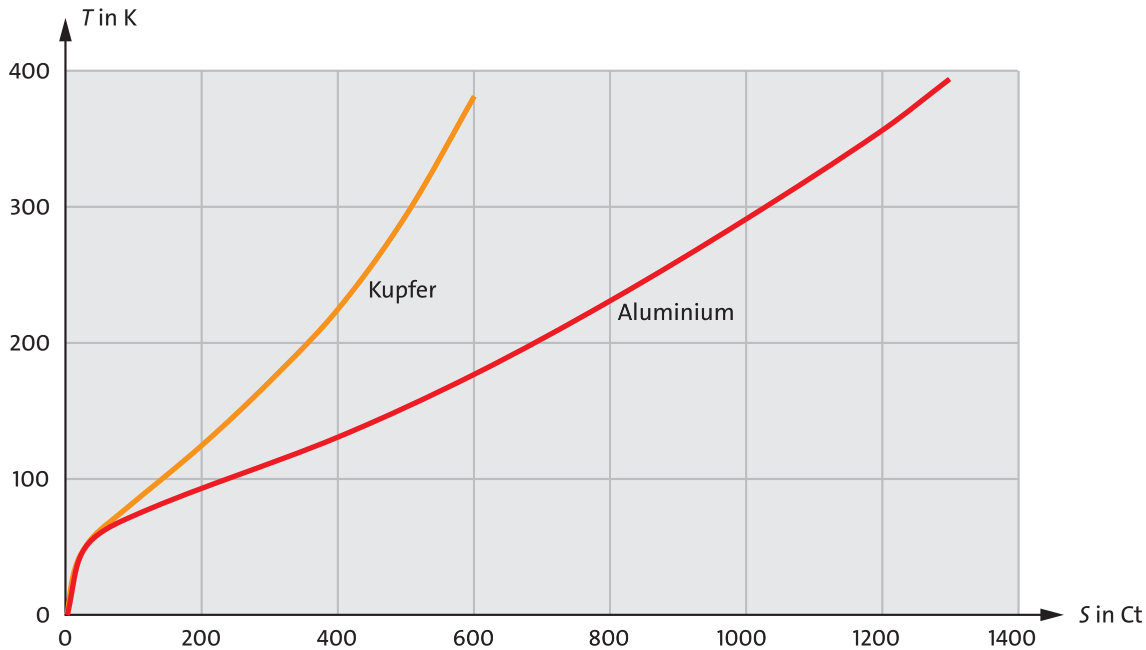


Abb. 11.19 Temperatur als Funktion des Entropieinhalts für 1 kg Kupfer und 1 kg Aluminium

Abb. 11.19 zeigt, wie die Temperatur mit dem Entropieinhalt wächst, und zwar für einen Körper aus Kupfer und einen aus Aluminium; beide haben eine Masse von 1 kg. Man entnimmt der Abbildung, dass man weniger Entropie braucht, um Kupfer auf eine bestimmte Temperatur zu bringen als Aluminium. Bei einer Temperatur von 300 K zum Beispiel enthält das Kupfer etwa 500 Ct, das Aluminium dagegen 1000 Ct, also doppelt so viel.

Oder man sieht an dem Diagramm, dass man mit einer gegebenen Entropiemenge das Kupfer stärker erwärmt als das Aluminium: Mit 500 Ct erreicht man beim Kupfer eine Temperatur von 300 K, beim Aluminium aber nur etwa 150 K.

Interessiert man sich nur dafür, was in der Gegend der normalen Umgebungstemperatur passiert, so ist ein Schaubild zweckmäßiger, dessen Achsen nicht bei null anfangen: ein vergrößerter Ausschnitt aus der ursprünglichen Abbildung.

Abb. 11.20 zeigt solche Ausschnitte für jeweils 1 kg der folgenden Stoffe: Kupfer, Eisen, Aluminium, Heizöl und Wasser. Je steiler eine Kurve ist, desto weniger Entropie braucht man, um eine gegebene Temperaturänderung zu bewirken.

Aufgaben

1. Einem Kilogramm Kupfer und einem Kilogramm Aluminium mit einer Anfangstemperatur von 25 °C werden je 80 Ct zugeführt. Welches Metall erwärmt sich stärker? Um welchen Faktor unterscheiden sich die Temperaturänderungen?
2. Wie viel Entropie braucht man, um 100 l Wasser von 20 °C auf 100 °C zu erwärmen? (1 l Wasser hat eine Masse von 1 kg.)

11.8 Der Zusammenhang zwischen Energiezufuhr und Temperaturänderung

Wenn man Wasser heiß machen will, muss man ihm Entropie zuführen. Zusammen mit der Entropie geht in das Wasser aber auch Energie hinein. Diese Tatsache ist wahrscheinlich den meisten bekannt: Man weiß, dass Wasser warm zu machen Geld kostet und dass man dieses Geld für die Energie bezahlt.

Wir wollen uns nun eine Formel beschaffen, die uns Auskunft über den Energieverbrauch beim Erhitzen von Wasser gibt. Wir nennen die dem Wasser beim Erhitzen zugeführte Energiemenge ΔE, nicht zu verwechseln mit der gesam-

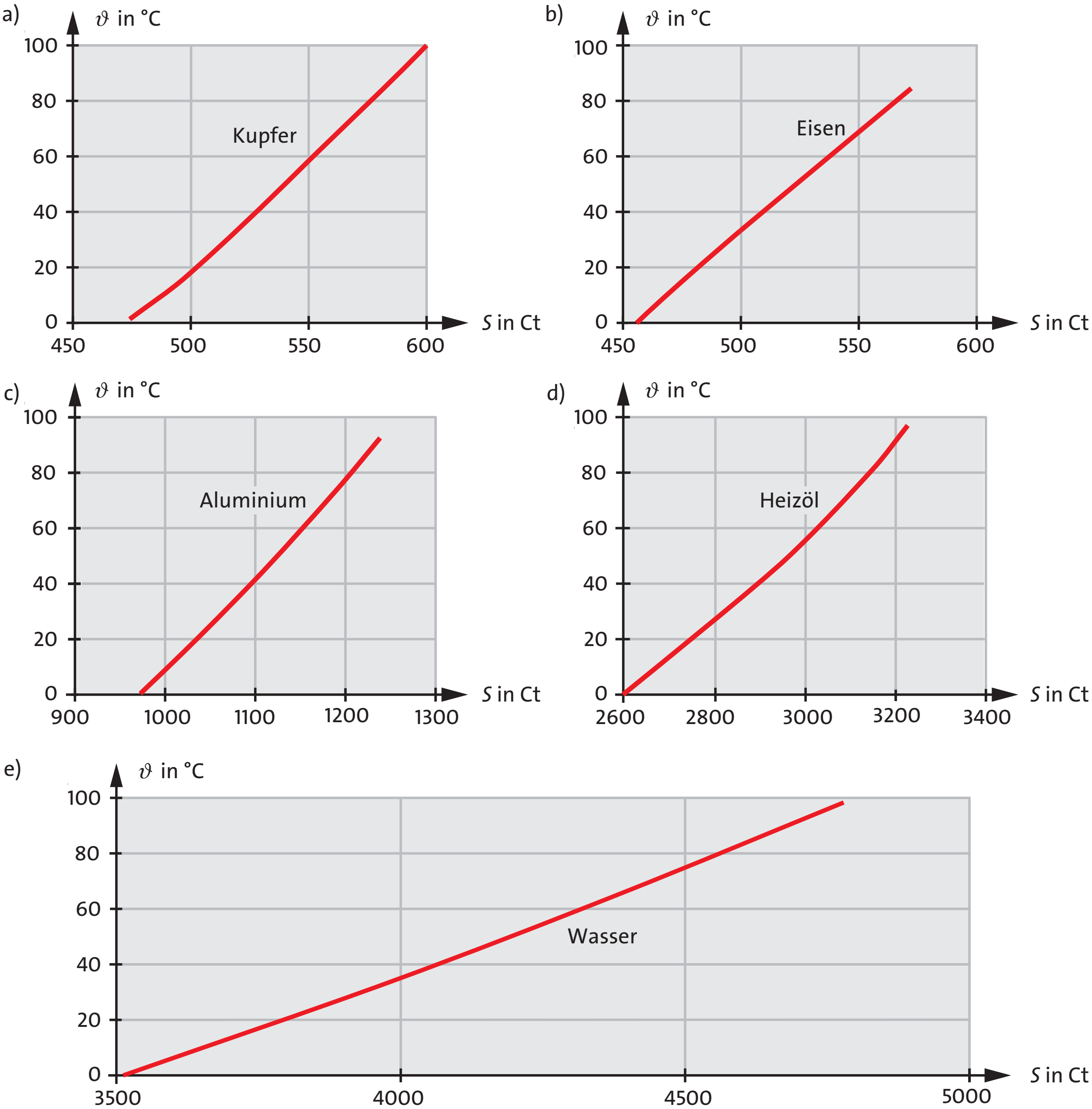


Abb. 11.20 Temperatur als Funktion des Entropieinhalts für jeweils 1 kg (a) Kupfer, (b) Eisen, (c) Aluminium, (d) Heizöl und (e) Wasser. Die Entropieskalen beginnen nicht mit dem Wert $S = 0$ Ct. Die Temperaturskalen beginnen nicht mit dem absoluten Nullpunkt, sondern mit dem Nullpunkt der Celsiusskala.

ten im Wasser enthaltenen Energie. Um 1 kg Wasser von 20 °C auf 100 °C zu erwärmen, brauchen wir eine bestimmte Energiemenge. Um 2 kg Wasser von 20 °C auf 100 °C zu erwärmen, brauchen wir natürlich doppelt so viel Energie. Es muss also gelten:

$$\Delta E \sim m\,.$$

Die zum Erwärmen notwendige Energie ist proportional zur Masse des Wassers.

Außerdem hängt die benötigte Energie ΔE noch davon ab, um wie viel °C wir die Temperatur erhöhen wollen. Wenn die Temperatur um 20 °C zunehmen soll, braucht man mehr Energie als wenn sie nur um 10 °C wachsen soll. Wir führen einer bestimmten Wassermenge mit dem

Tauchsieder Energie zu und messen die Temperaturzunahme ΔT als Funktion der zugeführten Energie ΔE. Wir stellen fest, dass ΔT proportional zu ΔE ist:

$$\Delta E \sim \Delta T .$$

Diese Beziehung gilt nicht mehr für sehr hohe und auch nicht für sehr niedrige Temperaturen, aber im Bereich zwischen 0 °C und 100 °C ist sie gut erfüllt. Zusammen mit der vorigen Proportionalität ergibt sich:

$$\Delta E \sim m \cdot \Delta T .$$

Um aus dieser Proportionalitätsbeziehung eine Gleichung zu machen, führen wir einen Proportionalitätsfaktor c ein:

$$\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Man nennt c die spezifische Wärmekapazität. Damit linke und rechte Seite der Gleichung dieselbe Maßeinheit haben, muss c in J/(kg · K) gemessen werden.

Der Wert von c hängt vom Material des Körpers ab, den man erwärmt oder abkühlt. Für Wasser ist

$$c = 4180 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}.$$

Aufgaben

1. Ein halber Liter Wasser soll mit einem 500-W-Tauchsieder von 25 °C auf 100 °C erhitzt werden. Wie lange braucht man dazu?
2. Wie hoch ist der Energieverbrauch für eine fünfminütige Dusche? Berechne zuerst, wie viel kg warmes Wasser während der 5 Minuten verbraucht werden. Nimm an, dass während des Duschens pro Sekunde 0,1 l Wasser aus dem Hahn fließen. Nimm außerdem an, dass das Wasser in den Warmwasserbereiter mit einer Temperatur von 15 °C hineinfließt und dass es mit einer Temperatur von 45 °C wieder herauskommt.

12 PHASENÜBERGÄNGE

12.1 Phasenübergänge

Wir hängen in ein Becherglas mit Wasser einen Tauchsieder, schalten ihn ein und messen die Temperatur des Wassers, Abb. 12.1. Während der Tauchsieder Entropie an das Wasser liefert, nimmt die Temperatur zu — zunächst wenigstens. Schließlich aber, wenn die Temperatur 100 °C erreicht hat, beginnt das Wasser zu sieden, und die Temperatur wächst nicht weiter, obwohl der Tauchsieder weiter Entropie abgibt. Wie kommt das?

Beim Sieden verwandelt sich flüssiges Wasser in gasförmiges, in Wasserdampf. Der Wasserdampf hat dieselbe Temperatur wie das flüssige Wasser während des Siedens, nämlich 100°C. Die Entropie, die wir dem Wasser zuführen, wird offensichtlich dazu gebraucht, das Wasser zu verdampfen. Wir schließen daraus, dass Wasserdampf mehr Entropie enthält als flüssiges Wasser.

Den Dampf kann man danach weiter erhitzen. Man leitet ihn durch ein Rohr und erhitzt das Rohr von außen, Abb. 12.2.

In Abb. 12.3 ist die Temperatur von 1 kg Wasser über dem Entropieinhalt des Wassers aufgetragen, und zwar über einen größeren Temperaturbereich als in Abb. 11.20e.

Man entnimmt der Kurve, dass 1 kg Wasserdampf etwa 6000 Ct mehr enthält als 1 kg flüssiges Wasser.

> Der Entropieinhalt von 1 kg Wasserdampf ist um 6000 Ct größer als der von 1 kg flüssigem Wasser.

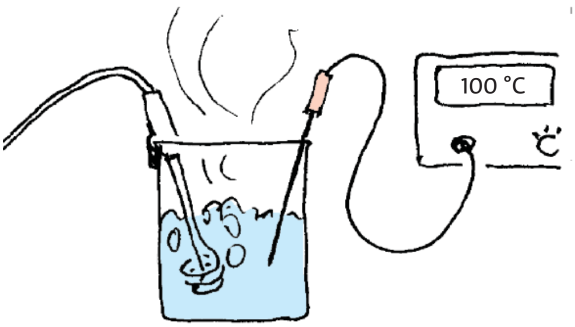


Abb. 12.1 Trotz weiterer Entropiezufuhr hört die Temperatur bei 100 °C auf zuzunehmen.

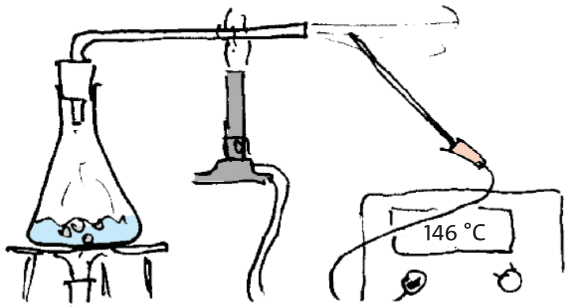


Abb. 12.2 Der Wasserdampf, der zunächst eine Temperatur von 100 °C hat, wird weiter erhitzt.

Das Diagramm zeigt außerdem, dass eine ähnliche Erscheinung beim Übergang fest → flüssig stattfindet. Flüssiges Wasser enthält etwa 1200 Ct mehr als festes Wasser, d. h. Eis. Um 1 kg Eis von 0 °C in 1 kg flüssiges Wasser von 0 °C zu verwandeln (d. h., um 1 kg Eis zu schmelzen), muss man ihm die Entropiemenge 1200 Ct zuführen. Eben-

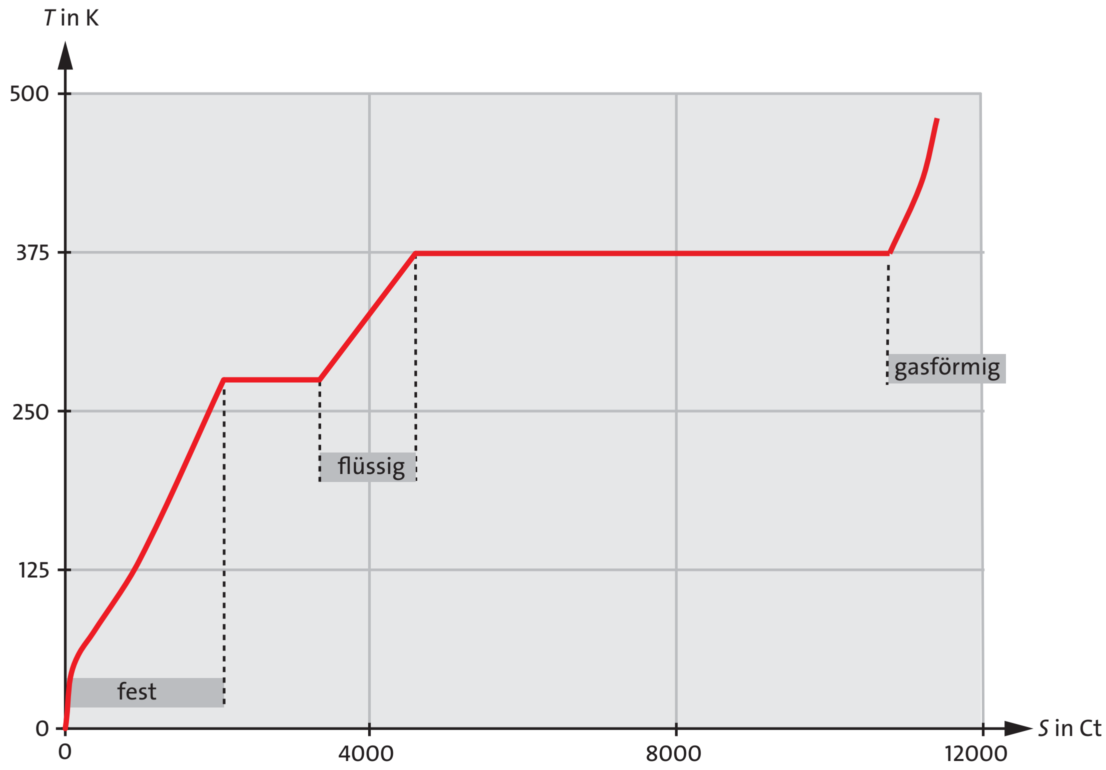


Abb. 12.3 Temperatur als Funktion des Entropieinhalts für 1 kg Wasser bei $p = 1$ bar

so gilt: Um 1 kg flüssiges Wasser in 1 kg Eis zu verwandeln, muss man ihm 1200 Ct entziehen.

> Der Entropieinhalt von 1 kg flüssigem Wasser ist um 1200 Ct größer als der von 1 kg Eis.

Etwas zur Sprechweise: Man sagt, ein Stoff trete in verschiedenen Phasen auf. So hat Wasser eine feste, eine flüssige und eine gasförmige Phase. Die gasförmige Phase nennt man Dampf. Unter Wasserdampf versteht man demnach gasförmiges Wasser. Für Übergänge zwischen den Phasen gibt es bestimmte Ausdrücke:

fest → flüssig: schmelzen
flüssig → fest: erstarren
flüssig → gasförmig: verdampfen
gasförmig → flüssig: kondensieren

Stoff	Schmelztemperatur in °C	Siedetemperatur in °C
Aluminium	660,0	2450,0
Kupfer	1083,0	2590,0
Eisen	1535,0	2880,0
Wasser	0,0	100,0
Ethanol	−114,5	78,3
Sauerstoff	−218,8	−183,0
Stickstoff	−210,0	−195,8
Wasserstoff	−259,2	−252,2

Tab. 12.1 Einige Schmelz- und Siedetemperaturen

Nicht nur Wasser tritt in verschiedenen Phasen auf, sondern auch andere Stoffe. Dass sich Metalle schmelzen lassen, weißt du sicher. Man kann sie sogar verdampfen. Alle Stoffe, die normalerweise gasförmig sind, lassen sich verflüssigen und in die feste Phase bringen. In Tab. 12.1 sind Schmelztemperatur und Siedetemperatur für einige Stoffe aufgeführt.

Es gibt aber nicht nur die drei Phasen „fest", „flüssig" und „gasförmig". So haben die Stoffe gewöhnlich mehrere feste Phasen, die sich in vielen Eigenschaften unterscheiden. Manche Stoffe haben mehrere flüssige Phasen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften.

Aufgaben

1. Entnimm Abb. 12.3, wie viel Entropie 1 kg Wasserdampf von 100 °C und wie viel Entropie 1 kg flüssiges Wasser von 100 °C hat. Um welchen Faktor ist der Wert für den Wasserdampf größer als der für die Flüssigkeit?
2. Wie viel Entropie wird gebraucht, um 10 l flüssiges Wasser von 90 °C in Dampf von 100 °C zu verwandeln?
3. Zum Schmelzen eines Eisklotzes werden 6000 Ct gebraucht. Welche Masse hatte der Eisklotz?
4. Ein Viertel Liter Mineralwasser wird mit Eiswürfeln von 20 °C auf 0 °C gekühlt. Wie viel Eis schmilzt bei diesem Vorgang? (Mineralwasser besteht im Wesentlichen aus Wasser.)
5. Mit dem Dampfstrahl einer Espressomaschine wird ein Glas Milch (0,2 l) von 15 °C auf 60 °C erwärmt. Wie viel Gramm Dampf werden gebraucht? (Milch besteht im Wesentlichen aus Wasser.)

12.2 Sieden und Verdunsten

Wir hatten gesehen, dass Wasser bei 100 °C siedet. In den gasförmigen Zustand geht es jedoch schon bei niedrigerer Temperatur über, nur langsamer. Man nennt diesen Vorgang „verdunsten". Hier noch einmal die verschiedenen Ausdrücke: Der Übergang flüssig → gasförmig heißt immer „verdampfen". Geschieht das Verdampfen bei der Siedetemperatur, d. h. schnell, so spricht man von „sieden". Geschieht es unterhalb der Siedetemperatur, d. h. langsam, so sagt man, das Wasser verdunstet.

Warum geht nun das Verdunsten langsam und das Sieden schnell? Worin unterscheiden sich die beiden Vorgänge? Wir betrachten eine Wasseroberfläche bei verschiedenen Temperaturen, Abb. 12.4.

Bei 20° C befindet sich unmittelbar darüber Luft, mit einem geringen Anteil Wasserdampf. Damit der Verdampfungsvorgang ablaufen kann, muss dieser Wasserdampf nach oben verschwinden, dorthin, wo die Luft weniger Wasserdampf enthält. Einen solchen Vorgang, bei dem sich ein Gas (hier Wasserdampf) durch ein anderes (hier Luft) „hindurchdrängen" muss, nennt man Diffusion. Das zweite Gas setzt dabei der Bewegung des ersten einen großen Widerstand entgegen. In unserem Fall bedeutet das, dass der Wasserdampf nur schlecht von der Wasseroberfläche wegkommt.

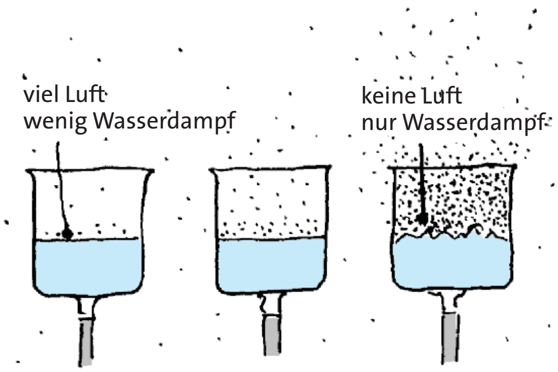


Abb. 12.4 Wenn das Wasser siedet, drückt der Wasserdampf alle Luft über der Wasseroberfläche weg.

Bei der höheren Temperatur befindet sich mehr Wasserdampf über der Wasseroberfläche. Der Antrieb für den Diffusionsvorgang ist jetzt größer, der Wasserdampf kommt schneller weg. Also darf das flüssige Wasser schneller nachliefern: Das Verdunsten geht schneller.

Bei 100 °C schließlich befindet sich direkt über der Wasseroberfläche nur noch reiner Wasserdampf. Damit er von der Wasseroberfläche wegkommt, braucht er sich nicht mehr durch Luft hindurchzudrängen. Er braucht nicht zu diffundieren, sondern er kann frei strömen, so wie Wasser in einer Wasserleitung oder wie die Luft, wenn ein Wind weht. Der Wasserdampf geht jetzt so schnell weg, wie er vom flüssigen Wasser nachgeliefert werden kann, und das flüssige Wasser liefert so schnell nach, wie es von der Heizung die zum Verdampfen nötige Entropie bekommt.

Wir können nun eine interessante Erscheinung verstehen: Ist der Luftdruck niedriger als 1 bar (Normaldruck), so siedet Wasser bei einer Temperatur, die niedriger als 100 °C ist. Denn ist der Luftdruck niedriger, so schafft es der von der Oberfläche des flüssigen Wassers kommende Dampf schon früher, d. h. bei niedrigerer Temperatur, die Luft vollständig zu verdrängen.

Man beobachtet diese Erscheinung zum Beispiel im Gebirge: Auf einem hohen Berg, d. h. dort, wo der Luftdruck geringer ist, ist die Siedetemperatur des Wassers kleiner als 100 °C. In 5 400 m Höhe ist der Luftdruck etwa 0,5 bar. Die Siedetemperatur des Wassers beträgt hier 83 °C.

12.3 Phasenübergänge in Natur und Technik

Bei einem Phasenübergang nimmt ein Stoff bei festbleibender Temperatur Entropie auf oder er gibt sie ab – je nach der Richtung, in der der Phasenübergang abläuft. Diese Tatsache wird technisch viel angewendet, und sie ist die Erklärung einiger interessanter Naturerscheinungen.

Die Verdunstungskälte

Wenn du aus dem Schwimmbecken steigst, und besonders wenn sich zusätzlich die Luft bewegt, frierst du. Das Wasser auf deiner Haut verdunstet. Dazu braucht es Entropie, und diese entzieht es deinem Körper. Das Verdunsten geht besonders schnell, wenn das bereits verdunstete Wasser durch die bewegte Luft weggetragen wird.

Heißer Dampf ist gefährlicher als heißes Wasser

Es ist längst nicht so schlimm, wenn dein Finger etwas Wasser von 100 °C abbekommt, als wenn er mit Dampf von 100 °C in Berührung kommt. In beiden Fällen wird Entropie auf den Finger übertragen, was eine Verbrennung zur Folge haben kann. Beim Dampf ist die Gefahr aber viel größer, denn der Dampf kondensiert am Finger und gibt dabei einen zusätzlichen, großen Entropiebetrag an den Finger ab.

Kältemischungen

Salzwasser hat eine niedrigere Schmelztemperatur als gewöhnliches, reines Wasser. Wir füllen in kleine Stücke geschlagenes Eis (oder Schnee) in ein Glas. Wir messen die Temperatur und finden, wie erwartet, 0 °C. Wir geben nun eine größere Menge Kochsalz hinzu und rühren um. Die Temperatur sinkt bis unter –10 °C.

Durch die Zugabe des Salzes sinkt die Schmelztemperatur. Ein Teil des Eises schmilzt. Dazu wird Entropie gebraucht. Da wir aber von außen keine Entropie nachliefern, kühlt sich die Eis-Wasser-Mischung ab. Es schmilzt nun mehr Eis, und die Temperatur sinkt weiter, bis sie schließlich den Wert der neuen Schmelztemperatur erreicht hat. Dann kommt der Vorgang zum Stillstand.

Entropiespeicher

Man kann Entropie dadurch speichern, dass man einen Gegenstand erwärmt. Lässt man die Entropie wieder aus dem Gegenstand heraus, so kühlt sich der Gegenstand wieder ab. Diese Methode wurde in den sogenannten Nachtspeicheröfen angewendet, Abb. 12.5. Ein Nachtspeicherofen besteht zum größten Teil aus Keramiksteinen. Während der Nacht, d. h., wenn die Energie billiger ist, werden die Steine mit Entropie geladen. Sie erwärmen sich dabei auf über 600°C. Am Tag holt man die Entropie wieder heraus, indem man Luft an den Steinen vorbeibläst.

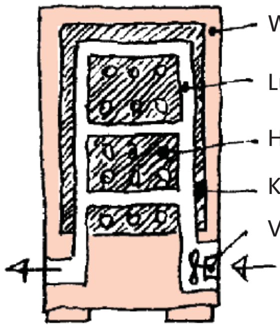


Abb. 12.5 Nachtspeicherofen

Man würde gern die im Sommer reichlich zur Verfügung stehende Entropie speichern und für den Winter aufheben. Dafür eignet sich aber die Methode der Nachtspeicheröfen nicht, denn man bekommt nicht sehr viel Entropie in die Steine. Eine aussichtsreichere Methode nutzt einen Phasenübergang aus.

Man wählt einen Stoff, der einen Phasenübergang fest → flüssig bei einer passenden Temperatur hat. Etwa 50 °C wäre günstig. (Es darf kein Phasenübergang flüssig → gasförmig sein, denn Gase nehmen zu viel Platz ein.) Man schmilzt nun im Sommer eine große Menge des Stoffs mithilfe von Sonnenentropie (und -energie). Im Winter holt man die Entropie heraus und heizt damit ein Haus. Wenn die Energiepreise in der Zukunft stark steigen, könnte dieses Verfahren der Nutzung von Sonnenenergie konkurrenzfähig werden.

Das Kühlen von Getränken mit Eis

Um eine Cola zu kühlen, kann man sie in den Kühlschrank stellen. Die Wärmepumpe des Kühl-

12 PHASENÜBERGÄNGE

schranks pumpt die Entropie aus der Cola heraus. Nun möchte man aber oft eine Cola kühlen, während sie auf dem Tisch steht, oder sie wenigstens kühl halten. Du weißt, wie man es macht: Man wirft ein paar Eiswürfel hinein. Warum gießt man aber stattdessen nicht einfach etwas kaltes Wasser in die Cola? Die Wirkung wäre viel geringer. Das Eis in der Cola schmilzt. Zum Schmelzen braucht es Entropie, und die entzieht es der Cola. Das Schmelzen dauert so lange, bis die Temperatur der Cola 0 °C erreicht hat (vorausgesetzt, es ist genug Eis darin).

Flüssiger Stickstoff

Wenn man etwas auf eine viel tiefere Temperatur bringen will, aber keine entsprechende Kühlmaschine hat, kühlt man mit flüssigem Stickstoff, den man billig kaufen kann.

Seine Siedetemperatur ist 77 K (–196 °C). Wie kann aber flüssiger Stickstoff überhaupt existieren, da doch die Umgebung eine viel höhere Temperatur hat? Man bewahrt den Stickstoff in einem gut wärmeisolierenden Behälter auf. Die wenige Entropie, die durch die Isolation hindurchgeht, hat ein ständiges, sehr langsames Sieden des Stickstoffs zur Folge. Die Temperatur des zurückbleibenden flüssigen Stickstoffs bleibt immer gleich 77 K, genauso wie siedendes Wasser seine Temperatur von 100 °C behält. So kann man den flüssigen Stickstoff tagelang aufbewahren.

Entropietransport mit Phasenübergängen

Wir hatten früher gesehen, dass Entropietransport durch Konvektion viel wirksamer ist als durch Wärmeleitung. Es gibt nun ein Transportverfahren, das noch besser funktioniert als die gewöhnliche Konvektion, Abb. 12.6. Der Stoff, der sich in den Rohren befindet, wird links, bei der Entropiequelle, verdampft. Dabei nimmt er viel Entropie auf. Er fließt dann durch die obere Leitung nach rechts. In der rechten Rohrschlange kondensiert er, wobei er die vorher aufgenommene Entropie wieder abgibt. Früher funktionierten Zentralheizungen nach diesem Prinzip, die sogenannten Dampfheizungen. Sie hatten allerdings einige Nachteile: Sie waren schwer zu regeln, und durch das Kondensieren des Dampfes entstanden in den Heizkörpern unangenehme Geräusche.

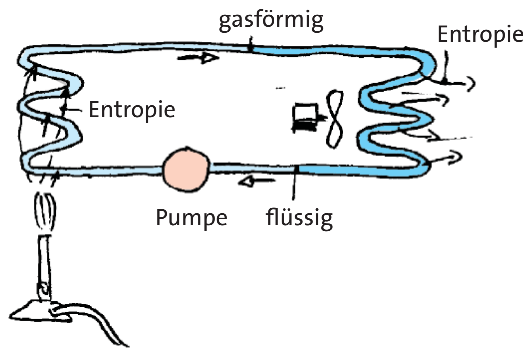


Abb. 12.6 Links wird ein Stoff verdampft. Dabei nimmt er viel Entropie auf. Er gibt sie rechts, beim Kondensieren, wieder ab.

Heute wird das Verfahren vor allem bei Wärmepumpen angewendet, etwa im Kühlschrank. In der Rohrschlange im Innern des Kühlschranks verdampft die Kühlflüssigkeit. Dabei nimmt sie Entropie auf. In der Rohrschlange außen kondensiert sie und gibt dabei Entropie ab. (Damit sie an der wärmeren Stelle kondensiert und an der kälteren verdampft, muss an der wärmeren Stelle der Druck höher sein als an der kälteren, und dafür sorgt ein Kompressor.)

Auch die Natur nutzt dieses Verfahren des Entropietransports aus. In der Atmosphäre laufen ständig Verdampfungs- und Kondensationsvorgänge ab. Wenn Wasser an einer Stelle verdampft, wird es dort kälter. Der Wasserdampf wird mit der Luft an eine andere Stelle getragen, wo er kondensiert. Dort wird es dann wärmer.

13 GASE

13.1 Gase und kondensierte Stoffe

Stoffe können fest, flüssig oder gasförmig sein.

Die flüssige und die gasförmige Phase haben etwas gemeinsam: Sowohl flüssige als auch gasförmige Stoffe können strömen. Wenn der Wind weht oder wenn ein Ventilator oder ein Föhn läuft, strömt Luft. Wasser strömt in Flüssen und Bächen und in den Meeren, und natürlich, wenn man den Wasserhahn aufdreht. Da Flüssigkeits- und Gasströmungen viel miteinander gemeinsam haben, fasst man sie manchmal zu einer einzigen Stoffklasse zusammen: Man nennt sie Fluide. Fluide sind demnach das Gegenteil von festen Stoffen.

Andererseits haben feste Stoffe mit flüssigen einige Eigenschaften gemeinsam, Eigenschaften, in denen sie sich von den Gasen unterscheiden. So haben feste und flüssige Stoffe, wie wir früher gesehen haben, eine viel größere Dichte als Gase. Man fasst daher oft feste und flüssige Stoffe zu einer Klasse zusammen: Man nennt sie kondensierte Stoffe. Kondensierte Stoffe sind das Gegenteil der Gase, Abb. 13.1.

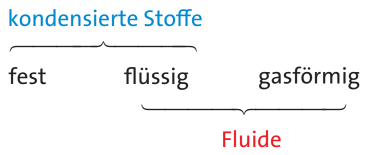


Abb. 13.1 Zwei Klasseneinteilungen der Stoffe

Das Ausbreitungsstreben

Wir pumpen aus einem Glasbehälter die Luft heraus und lassen etwas Wasser hineintropfen, Abb. 13.2.

Das Wasser fällt nach unten, genauso wie in einem nichtevakuierten Behälter. Wir wiederholen den Versuch, lassen aber statt des Wassers Luft in den Behälter eintreten. Damit man sieht, wohin die Luft geht, lassen wir sie vorher durch eine Zigarette strömen. (Du siehst, wozu Zigaretten gut sind.) Diese Versuche zeigen:

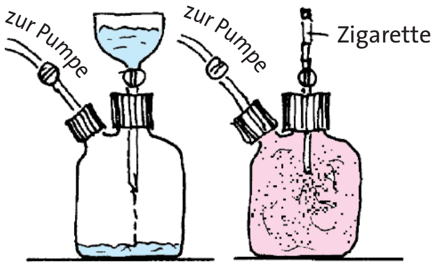


Abb. 13.2 Gase nehmen den ganzen zur Verfügung stehenden Raum ein, Flüssigkeiten nicht.

> Gase füllen den ganzen ihnen zur Verfügung stehenden Raum aus, kondensierte Stoffe nicht.

Wenn man etwas auf eine kurze Formel bringen will, muss man oft vereinfachen. Der Merksatz stellt eine solche Vereinfachung dar. Er gilt meist, aber nicht immer. Er gilt zum Beispiel nicht für die Luft über der Erdoberfläche, als Ganzes gesehen. Dieser Luft steht ja der ganze Weltraum zur Verfügung. Trotzdem entweicht sie nicht von der Erde. Warum nicht?

Die Zusammendrückbarkeit

In einem zylinderförmigen Gefäß mit einem verschiebbaren Kolben befindet sich Luft. Drückt man den Kolben in den Zylinder hinein, so wird die Luft zusammengedrückt oder „komprimiert", Abb. 13.3a. Befindet sich dagegen in dem Zylinder Wasser statt Luft, Abb. 13.3b, so lässt sich der Kolben nicht hineindrücken, Wasser ist nicht zusammendrückbar. Wenn man ganz genau hinsieht, kann man auch bei Wasser eine winzige Zusammendrückbarkeit feststellen, aber sie kann für viele praktische Zwecke vernachlässigt werden.

Auch wenn man in den Zylinder mit dem Wasser zusätzlich einen festen Gegenstand bringt, Abb. 13.3c, lässt sich der Kolben nicht hineinschieben, denn feste Gegenstände sind ebenfalls (fast) nicht zusammendrückbar. Manche festen Körper erwecken den Eindruck, als seien sie leicht zusammendrückbar, Schaumstoff zum Beispiel. Was man hier zusammendrückt, ist aber gar nicht der Feststoff selbst, sondern nur die Luft, die sich in den Poren des Stoffs befindet.

Wir können unsere Beobachtungen zusammenfassen:

> Gase lassen sich zusammendrücken, kondensierte Stoffe fast nicht.

„Zusammendrücken" bedeutet, dass man das Volumen einer bestimmten Stoffportion verkleinert, wobei ihre Masse konstant bleibt. Aus der Formel $\rho = m/V$ folgt daher, dass beim Zusammendrücken die Dichte des Stoffs zunimmt. Bei einem zusammendrückbaren Stoff lässt sich die Dichte erhöhen, indem man den Druck erhöht. Bei einem nicht zusammendrückbaren Stoff bewirkt eine Druckerhöhung keine Dichteänderung. Wir können diesen Sachverhalt zusammenfassen:

> Die Dichte von Gasen erhöht sich bei Druckzunahme, die von kondensierten Stoffen fast nicht.

Diese Tatsache hat interessante Konsequenzen, zum Beispiel: Die Dichte des Wassers in einem See nimmt nach unten hin fast nicht zu, obwohl der Druck zunimmt. In jeder Tiefe ist die Dichte

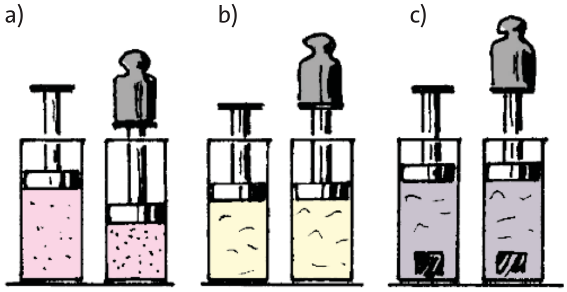


Abb. 13.3 Gase (a) sind zusammendrückbar, Flüssigkeiten (b) und feste Stoffe (c) nicht.

des Wassers praktisch dieselbe, nämlich etwa 1000 kg/m^3. Ganz anders ist es bei der Luft über der Erdoberfläche. Der Druck nimmt nach oben hin ab und als Folge davon die Dichte. Daher wird das Atmen immer mühsamer, wenn man einen hohen Berg besteigt.

Die thermische Ausdehnung

Gase und kondensierte Stoffe reagieren unterschiedlich, wenn man ihnen Entropie zuführt.

Erwärmt man einen festen Körper, so ändert sich sein Volumen fast nicht. Dasselbe gilt für Flüssigkeiten. Ganz anders ist es bei den Gasen. Erwärmt man die Luft in einem oben offenen Behälter, Abb. 13.4a, so dehnt sie sich stark aus und „läuft über". Da die Luft unsichtbar ist, sieht man das Überlaufen nicht. Man kann es aber durch einen Trick leicht sichtbar machen, Abb. 13.4b.

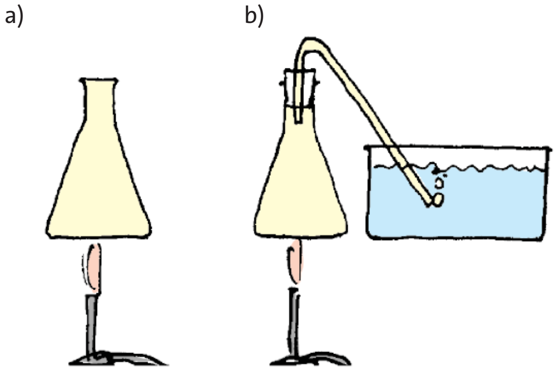


Abb. 13.4 Gase dehnen sich bei Entropiezufuhr aus. Im rechten Experiment wird das Überlaufen des Gefäßes sichtbar gemacht.

> Gase dehnen sich bei Entropiezufuhr aus, kondensierte Stoffe fast nicht.

Aufgaben

1. Warum haben Fahrräder Reifen, die mit Luft gefüllt sind? Warum füllt man die Reifen nicht mit Wasser?
2. Abb. 13.5 zeigt einen Heißluftballon. Er ist nach unten hin offen. Die Luft im Ballon wird mithilfe einer Gasflamme erhitzt. Warum steigt er auf?

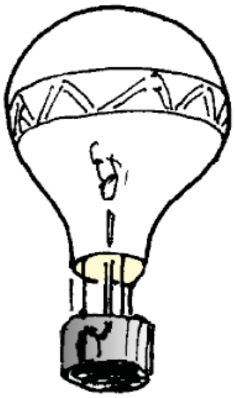


Abb. 13.5 Heißluftballon (zu Aufgabe 2)

13.2 Die thermischen Eigenschaften der Gase

Wir haben im vorigen Abschnitt Gase und kondensierte Stoffe miteinander verglichen. Von jetzt an wollen wir uns nur noch mit den Gasen beschäftigen. Sie sind in Hinblick auf die thermischen Eigenschaften viel interessanter als kondensierte Stoffe.

Zunächst wollen wir einem Gas Entropie zuführen. Wir hindern es allerdings daran, sich auszudehnen, indem wir es in einen Behälter festen Volumens einsperren, Abb. 13.6.

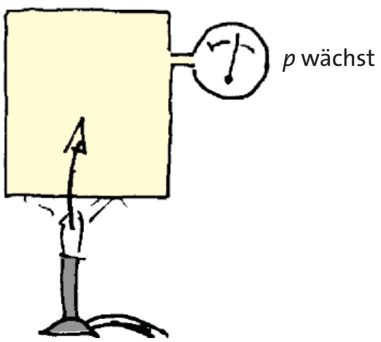


Abb. 13.6 Führt man einem Gas bei konstantem Volumen Entropie zu, so wächst sein Druck.

Das Manometer zeigt an, dass der Druck während der Entropiezufuhr wächst. Wir können diese Beobachtung und die letzte aus dem vorigen Abschnitt zusammenfassen:

> Führt man einem Gas bei konstantem Druck Entropie zu, so nimmt sein Volumen zu.
> Führt man einem Gas bei konstantem Volumen Entropie zu, so wächst sein Druck.

In beiden Fällen nimmt natürlich auch die Temperatur des Gases zu.

Man kann diese Vorgänge symbolisch beschreiben, indem man von jeder der vier Größen Entropie, Temperatur, Volumen und Druck angibt, ob sie konstant bleibt, abnimmt oder wächst:

$$S\uparrow \quad T\uparrow \quad V\uparrow \quad p = \text{const} \qquad (13.1)$$

$$S\uparrow \quad T\uparrow \quad V = \text{const} \quad p\uparrow \qquad (13.2)$$

Wir drücken noch einmal die Luft in einem Zylinder zusammen, messen aber diesmal die Temperatur, Abb. 13.7.

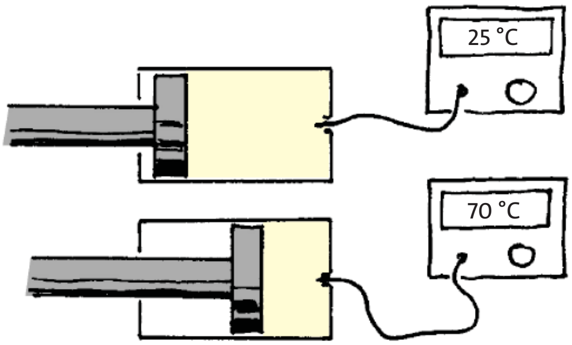


Abb. 13.7 Beim Zusammendrücken eines Gases nimmt die Temperatur zu.

Wir stellen fest, dass die Temperatur beim Zusammendrücken steigt. Lässt man die Luft sich entspannen, so sinkt die Temperatur wieder.

Dieses Verhalten der Luft ist im Grunde plausibel: Beim Zusammendrücken wird auch die in der Luft enthaltene Entropie zusammengedrückt, d.h. auf einen kleineren Raumbereich konzentriert. Viel Entropie in einem kleinen Raumbereich bedeutet also hohe Temperatur.

> Verringert man das Volumen eines Gases, so wächst seine Temperatur.

In Symbolen ausgedrückt, ergibt sich:

$$S = \text{const} \quad T\uparrow \quad V\downarrow \quad p = \uparrow \qquad (13.3)$$

Die Ausdrücke (13.1) bis (13.3) beschreiben drei verschiedene Vorgänge, die man mit Gasen ausführen kann. Natürlich gilt auch die Umkehrung jeder dieser Aussagen. Die Umkehrung von (13.1) etwa lautet:

$$S\downarrow \quad T\downarrow \quad V\downarrow \quad p = \text{const} \qquad (13.1)$$

Bei jedem der Vorgänge (13.1) bis (13.3) wird eine andere Größe konstant gehalten, bei (13.1) der Druck, bei (13.2) das Volumen und bei (13.3) die Entropie. Es fehlt uns nur noch ein Prozess, bei dem die Temperatur konstant bleibt. Aber auch ein solcher Vorgang ist leicht auszuführen. Es genügt, das Gas von Abb. 13.7 sehr langsam zusammenzudrücken, Abb. 13.8.

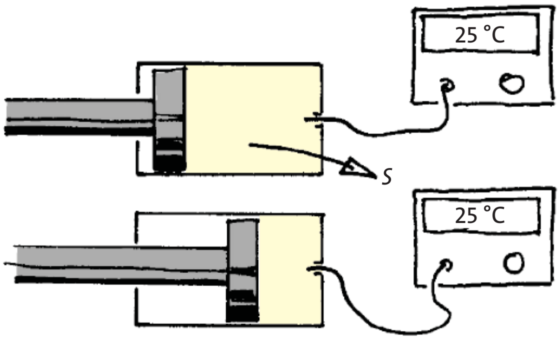


Abb. 13.8 Schiebt man den Kolben sehr langsam in den Zylinder hinein, so entweicht Entropie aus dem Gas.

Eigentlich würde das Zusammendrücken eine Temperaturerhöhung verursachen. Wenn wir jedoch sehr langsam drücken, kann sich die Temperatur der Luft ständig mit der Umgebung ausgleichen. Dabei fließt Entropie vom Gas in die Umgebung ab. Am Ende muss daher weniger Entropie in der Luft sein als vorher. In Symbolen ausgedrückt erhält man:

$$S\downarrow \quad T = \text{const} \quad V\downarrow \quad p = \uparrow \qquad (13.4)$$

Auch diese Zeile ist interessant. Sie passt nämlich mit einer Erfahrung zusammen, die wir früher gemacht hatten: Je größer das Volumen einer Stoffportion ist (bei fester Masse und fester Temperatur), desto mehr Entropie enthält sie. Dieses Verhalten war uns beim Phasenübergang flüssig → gasförmig begegnet: Das Gas (großes Volumen) enthält bei derselben Temperatur mehr Entropie als die Flüssigkeit (kleines Volumen).

In Abb. 13.9 sind die vier Prozesse (13.1) bis (13.4) und ihre Umkehrungen zusammengefasst.

$S\uparrow$	$T\uparrow$	$V\uparrow$	$p = \text{const}$	1a
$S\downarrow$	$T\downarrow$	$V\downarrow$	$p = \text{const}$	1b
$S\uparrow$	$T\uparrow$	$V = \text{const}$	$p\uparrow$	2a
$S\downarrow$	$T\downarrow$	$V = \text{const}$	$p\downarrow$	2b
$S = \text{const}$	$T\uparrow$	$V\downarrow$	$p\uparrow$	3a
$S = \text{const}$	$T\downarrow$	$V\uparrow$	$p\downarrow$	3b
$S\downarrow$	$T = \text{const}$	$V\downarrow$	$p\uparrow$	4a
$S\uparrow$	$T = \text{const}$	$V\uparrow$	$p\downarrow$	4b

Abb. 13.9 Symbolische Darstellung von vier Prozessen. Bei jedem wird eine der vier Größen S, T, V und p konstant gehalten.

Aufgaben

1. Es werden gebraucht: eine gut verschließbare Flasche und eine Schüssel mit heißem und eine mit kaltem Wasser (es geht auch mit den beiden Abteilungen des Spülbeckens).
a) Die Luft in der offenen Flasche wird mithilfe des kalten Wassers gekühlt. Die Flasche wird verschlossen und unter die Wasseroberfläche des warmen Wassers gedrückt. Der Verschluss der Flasche wird ein wenig gelockert, sodass er nicht mehr dicht ist. Was passiert? Erklärung?
b) Die Luft in der offenen Flasche wird mithilfe des heißen Wassers erhitzt. Die Flasche wird verschlossen und unter die Wasseroberfläche des kalten Wassers gedrückt. Der Verschluss der Flasche wird ein wenig gelockert. Was passiert? Erklärung?
2. In zwei Behältern befindet sich die gleiche Menge des gleichen Gases bei gleicher Temperatur. Den beiden Gasen wird nun die gleiche Entropiemenge zugeführt. Bei dem einen wird dabei das Volumen konstant gehalten, bei dem anderen der Druck. Sind die Temperaturänderungen in beiden Gasen gleich? Wenn nein, in welchem Gas ist die Temperaturänderung größer? Nimmt die Temperatur zu oder ab? Begründung!
3. Wie kann man es erreichen, dass die Temperatur eines Gases abnimmt, obwohl man ihm Entropie zuführt?

13.3 Die Funktionsweise von Wärmemotoren

Wir hatten in Abschnitt 11.4 gesehen, dass in einem Wärmemotor Entropie von hoher auf niedrige Temperatur hinuntergeht und dabei etwas „antreibt" — genauso wie in einer Wasserturbine Wasser von hohem auf niedrigen Druck hinuntergeht und dabei etwas antreibt.

Wie schafft man es aber, Entropie von hoher auf niedrige Temperatur zu bringen und dabei etwas in Bewegung zu setzen?

Entropie von hoher Temperatur auf niedrige zu bringen, ohne etwas anzutreiben, ist kein Problem. Das passiert meist schon von allein: Man lässt die Entropie einfach von der hohen zur niedrigen Temperatur durch einen Wärmeleiter „hinunterrutschen" (siehe auch Abschnitt 11.3). Die Energie, die man eigentlich auf einen nützlichen Energieträger, also zum Beispiel auf Drehimpuls, umladen könnte, geht dabei aber vollständig mit der erzeugten Entropie weg. Sie ist verschwendet worden.

Wie bringen wir also die Entropie von der hohen Temperatur auf die niedrige, ohne weitere Entropie zu erzeugen? Seitdem wir die thermischen Eigenschaften der Gase kennen, stellt das kein großes Problem für uns dar. Abb. 13.10 zeigt, wie man es im Prinzip macht.

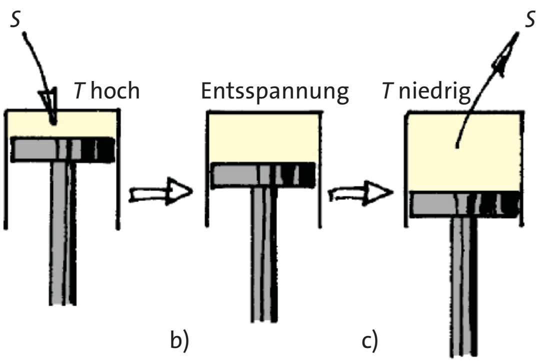


Abb. 13.10 Funktionsprinzip von Wärmemotoren. (a) Die Entropie wird einem komprimierten Gas zugeführt. (b) Das Gas entspannt sich. Dabei sinkt seine Temperatur, und es gibt Energie ab. (c) Die Entropie wird auf niedriger Temperatur wieder abgegeben.

Man bringt die Entropie in ein verdichtetes Gas und lässt dann das Gas sich entspannen. Nach Zeile (3b) in Abb. 13.9 nimmt dabei die Temperatur ab, und gleichzeitig wird der Kolben nach außen gedrückt. Die Energie, die die Entropie ablädt, geht mit der Kolbenstange weg, etwa zu einer Kurbel, die eine Welle in Drehung versetzt.

> In einem Wärmemotor lässt man ein Gas sich entspannen. Dabei nehmen Druck und Temperatur des Gases ab, und das Gas gibt Energie ab.

Dies ist die Grundidee aller Wärmemotoren. Es gibt eine große Zahl verschiedener technischer Realisierungen dieser Idee: Kolbendampfmaschine, Dampfturbine, Ottomotor, Dieselmotor, Strahltriebwerk und andere.

Wir sehen uns zwei dieser Maschinen genauer an: erstens die Kolbendampfmaschine, weil sie früher eine sehr wichtige Rolle gespielt hat; und zweitens den Ottomotor, weil die meisten Autos von ihm angetrieben werden.

Die Kolbendampfmaschine

Das größte Problem dabei, eine Maschine zu realisieren, die nach dem Prinzip von Abb. 13.10 arbeitet, besteht darin, die Entropie schnell in die Maschine hinein- und wieder herauszubekommen. Auf keinen Fall geht es so wie in Abb. 13.10 angedeutet, nämlich, die Entropie durch gewöhnliche Wärmeleitung in den Arbeitszylinder hineinfließen zu lassen. Dieser Vorgang verliefe viel zu langsam. Wir kennen bereits einen Trick, durch den man Entropie sehr schnell von einer Stelle zur anderen bekommt: durch Konvektion. Und so macht man es bei der Dampfmaschine.

Man heizt das Gas außerhalb des Zylinders auf und leitet es, zusammen mit seiner Entropie, in den Zylinder. Dort entspannt es sich und gibt gleichzeitig Energie an den Kolben ab. Danach lässt man es, zusammen mit seiner Entropie, wieder aus dem Zylinder heraus.

Wie das bei der Dampfmaschine im Einzelnen funktioniert, zeigt Abb. 13.11.

Als Arbeitsgas verwendet man Wasserdampf. Der Dampf wird im Kessel erzeugt und noch nacherhitzt. Die Schiebersteuerung steuert den Dampfeinlass und -auslass des Zylinders. Der Kolben befinde sich zunächst ganz links, Abb. 13.11a. Von links strömt heißer Frischdampf in den linken Teil des Zylinders. Nachdem sich

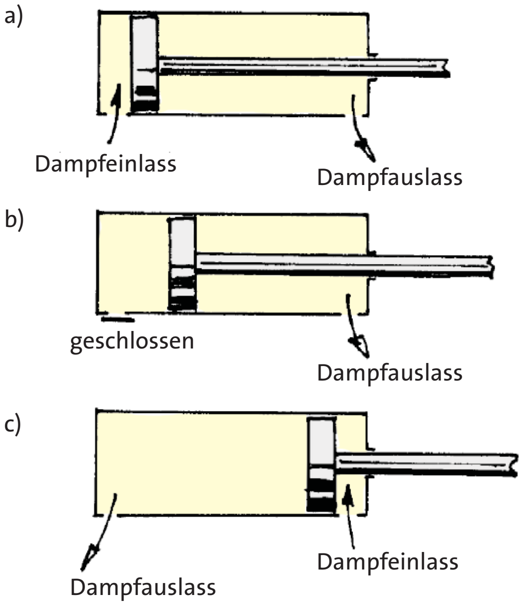


Abb. 13.11 Zylinder einer Kolbendampfmaschine zu drei verschiedenen Zeitpunkten

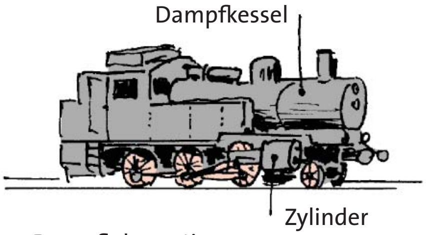


Abb. 13.12 Dampflokomotive

der Kolben ein kleines Stück nach rechts bewegt hat, Abb. 13.11b, schließt der Schieber den Dampfeinlass. Der Dampf drückt den Kolben weiter nach rechts und entspannt sich dabei, Druck und Temperatur nehmen ab. Der Kolben erreicht den rechten Umkehrpunkt, Abb. 13.11c, und beginnt zurückzulaufen. Der Schieber hat inzwischen die Auslassöffnung freigegeben. Der entspannte, abgekühlte Dampf wird mitsamt seiner Entropie ins Freie gedrückt.

Die entsprechenden Vorgänge spielen sich auf der rechten Seite des Kolbens ab. Der Dampf auf der rechten Seite drückt den Kolben nach links.

Die verschiedenen Teile einer solchen Dampfmaschine sind bei einer Dampflokomotive gut zu erkennen, Abb. 13.12.

Der Ottomotor

Der Trick, schnell Entropie in den Zylinder zu bekommen, besteht hier darin, dass man die Entropie im Zylinder erzeugt, und zwar durch die Verbrennung eines Gemischs aus gasförmigem Benzin und Luft. Diese Verbrennung verläuft explosionsartig, d. h. sehr schnell.

Man muss also als Erstes den Zylinder mit dem brennbaren Benzin-Luft-Gemisch füllen und dieses Gemisch zusammendrücken. Das geschieht dadurch, dass man den Motor zunächst eine Umdrehung lang als Pumpe arbeiten lässt.

Man bezeichnet jede halbe Umdrehung der Kurbelwelle als einen Takt. Das Laden des Motors, das Pumpen, dauert also zwei Takte lang: Während des Ansaugtaktes wird Benzin-Luft-Gemisch in den Zylinder hineingesaugt, Abb. 13.13a. Im Kompressionstakt wird es zusammengedrückt, Abb. 13.13b. Der Kolben befindet sich

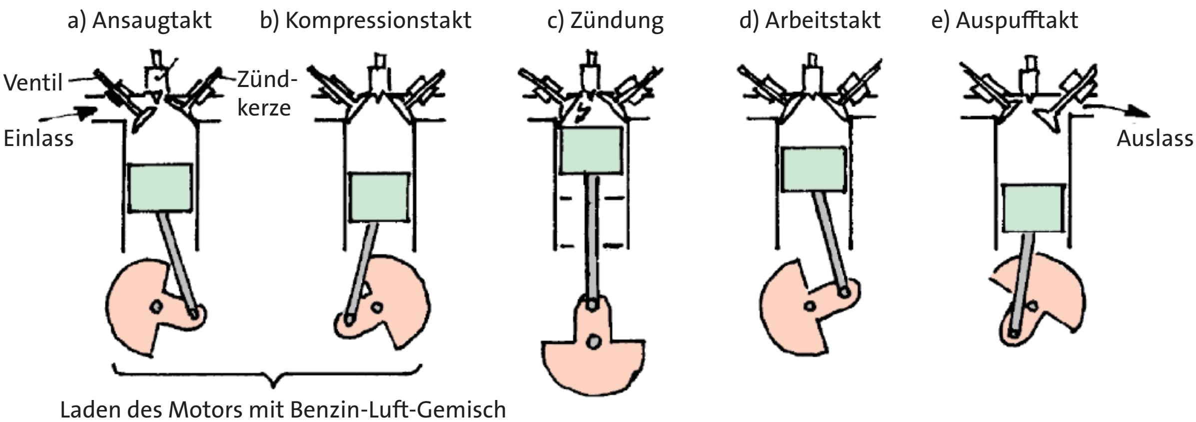


Abb. 13.13 Ottomotor in fünf verschiedenen Zeitpunkten seines Arbeitszyklus

nun im oberen Totpunkt, und der Zylinder ist bereit zur Arbeit, Abb. 13.13c. Mithilfe eines elektrischen Funkens, den die Zündkerze erzeugt, wird das Benzin-Luft-Gemisch entzündet. Es verbrennt praktisch instantan. Bei der Verbrennung wird Entropie erzeugt, Temperatur und Druck steigen stark an. Das heiße Gas drückt den Kolben nach unten. Dabei nehmen Temperatur und Druck ab. Dieser Takt ist der Arbeitstakt, Abb. 13.13d. Danach, beim Auspufftakt, werden die Abgase, zusammen mit ihrer Entropie, zum Auspuff hinausgedrückt, Abb. 13.13e.

Ein solcher Einzylindermotor arbeitet, wie man sieht, nur ein Viertel der Zeit, nämlich während des Arbeitstaktes. Die restlichen drei Takte läuft er vom Schwung weiter. Ein Ottomotor läuft „runder“, wenn er mehrere Zylinder hat, die sich mit der Arbeit abwechseln. Die meisten Automotoren haben vier Zylinder. Wenn ein solcher Motor läuft, hat in jedem Augenblick einer der Zylinder seinen Arbeitstakt.

Zu einem Ottomotor gehören noch eine Reihe Hilfsgeräte:

- der Vergaser; hier wird das Benzin verdampft und mit Luft gemischt;
- die Benzinpumpe; sie befördert das Benzin vom Tank zum Vergaser;
- Zündspule und Unterbrecher; sie erzeugen die hohe elektrische Spannung für den Zündfunken;
- der Zündverteiler; er legt die Hochspannung an die jeweils richtige Zündkerze.

Aufgaben

1. Stell dir vor, die „Arbeitssubstanz“ in dem Wärmemotor von Abb. 13.10 wäre nicht ein Gas, sondern eine Flüssigkeit. Würde der Motor funktionieren? Begründung!
2. Ein Dieselmotor ist ganz ähnlich gebaut wie ein Ottomotor. Ein Unterschied: Er hat keine Zündkerzen. Das Brennstoff-Luft-Gemisch entzündet sich von selbst. Wie ist das möglich?
3. Statt die Dampfzufuhr zum Zylinder einer Kolbendampfmaschine zu schließen, nachdem sich der Kolben ein kleines Stück nach rechts bewegt hat, könnte man sie offen lassen, bis der Kolben ganz rechts angekommen ist. Die Maschine wäre dann stärker, sie würde mehr Energie abgeben. Bei Dampflokomotiven war diese Betriebsart möglich. Man benutzte sie zum Anfahren und zum Bergauffahren. Welchen Nachteil hat diese Betriebsart?

13.4 Warum die Luft über der Erdoberfläche nach oben kälter wird

Auf einem hohen Berg ist es kälter als unten im Tal. Je höher man geht, desto niedriger wird die Temperatur. Je hundert Meter Höhenzunahme sinkt sie um etwa 1 °C. Im Flugzeug wird auf den Monitoren der eindrucksvoll niedrige Wert der Außentemperatur angezeigt. Bei einem Flugzeug in 10 000 m Höhe sind es etwa –55 °C.

Wie lassen sich diese tiefen Temperaturen erklären? Sollte sich der Temperaturunterschied zwischen oben und unten nicht ausgleichen? Die Entropie strömt doch, wie wir wissen, von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur. Dabei gibt es allerdings ein Hindernis. Die Entropie strömt nur, wenn der Strömungswiderstand nicht zu groß ist. Und Luft ist bekanntlich ein sehr gutes Isolationsmaterial. Einige Millimeter Luft zwischen den Scheiben eines doppelt verglasten Fensters sind schon sehr wirksam. Zwischen oberem und unterem Teil der Erdatmosphäre haben wir eine kilometerdicke Luftschicht. Ein Temperaturausgleich durch Wärmeleitung ist daher praktisch unmöglich.

Wie kommt aber der Temperaturunterschied überhaupt zustande? Wir müssen unsere Kenntnisse der thermischen Eigenschaften der Gase bemühen. Die Luft der Erdatmosphäre ist in ständiger Bewegung. Wodurch, das werden wir im nächsten Abschnitt sehen. Stellen wir uns im Augenblick einfach vor, jemand rühre die Luft ständig um.

Wir betrachten eine bestimmte Luftportion, die sich gerade nach unten bewegt. Da der Druck nach unten hin zunimmt, verkleinert sich ihr Volumen. Weil nun der Entropieinhalt der Luftportion konstant bleibt, muss ihre Temperatur nach Zeile (3a) in Abb. 13.9 zunehmen.

Mit einer Luftportion, die sich gerade nach oben bewegt, passiert gerade das Umgekehrte: Ihre Temperatur nimmt ab.

Ein bestimmtes Luftpaket mit einem bestimmten Entropieinhalt ändert also seine Temperatur, wenn man es hinauf- und hinunterbewegt. Weiter oben ist es kälter, weiter unten wärmer. Zu jeder Höhe gehört eine bestimmte Temperatur.

13.5 Thermische Konvektion

Warme Luft steigt nach oben, wie jeder weiß. Aber warum? Die Erklärung fällt uns leicht, nachdem wir Experten auf dem Gebiet der thermischen Eigenschaften von Gasen geworden sind. Wir betrachten den Heizkörper einer Zentralheizung. Die Luft in der Nähe des Heizkörpers wird erhitzt, sie dehnt sich aus (siehe Abschnitt 13.2). Dadurch wird ihre Dichte geringer als die der umgebenden, nicht erwärmten Luft. Die erwärmte Luft steigt daher nach oben (siehe Abschnitt 4.8). Damit ist das Wesentliche geklärt.

Nun passiert mit unserer Luft, nachdem sie nach oben gestiegen ist, noch mehr: Sie gibt nach und nach ihre Entropie an die kältere Umgebungsluft und an die Gegenstände im Zimmer ab und kühlt sich dabei wieder ab. Ihre Dichte nimmt daher wieder zu, und sie wird von der frisch aufgeheizten, aufsteigenden Luft verdrängt: Sie strömt wieder nach unten, und ersetzt dort die warme, aufsteigende Luft. Kurz: Es entsteht ein Kreislauf, Abb. 13.14. Einen solchen ständigen Strömungsvorgang nennt man thermische Konvektion.

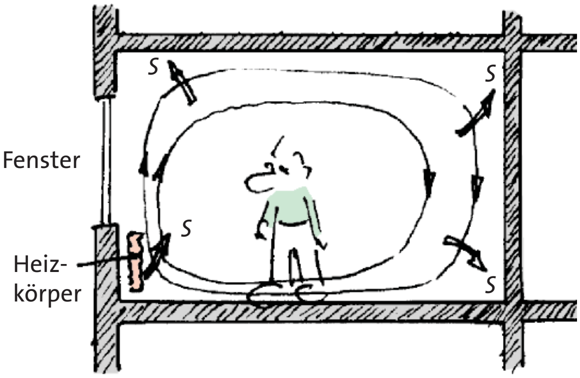


Abb. 13.14 Thermische Konvektionsströmung in einem geheizten Zimmer

Die thermische Konvektion ist verantwortlich für viele Entropietransporte in Natur und Technik. Ein Beispiel dafür hatten wir gerade besprochen: Die thermische Konvektion sorgt dafür, dass die Entropie, die die Zentralheizungskörper abgeben, im ganzen Zimmer verteilt wird.

Auch bei der Entstehung des Windes spielt die thermische Konvektion eine wichtige Rolle. Manche Windsysteme kommen zwar auf sehr komplizierte Art zustande. In anderen Fällen liegt aber ganz einfach eine thermische Konvektion vor.

Ein Beispiel ist der Seewind. Es ist der Wind, der an der Küste tagsüber vom Meer zum Land weht. Durch die Sonnenstrahlung erhöht sich die Temperatur der Erde auf dem Land stark, die des Wassers nur sehr wenig (denn die Entropie verteilt sich beim Wasser in einer viel größeren Tiefe). Die Luft über dem Land dehnt sich daher aus, vermindert ihre Dichte und steigt auf, Abb. 13.15. Vom Meer, über dem sich die Luft nicht ausdehnt, strömt Luft in Richtung Land. In einigen hundert Meter Höhe strömt die Luft vom Land zurück zum Meer, um über dem Meer wieder abzusinken. Die von der Sonne aufgeheizte Erdoberfläche entspricht dem Heizkörper im Fall der Konvektionsströmung in unserem vorigen Beispiel.

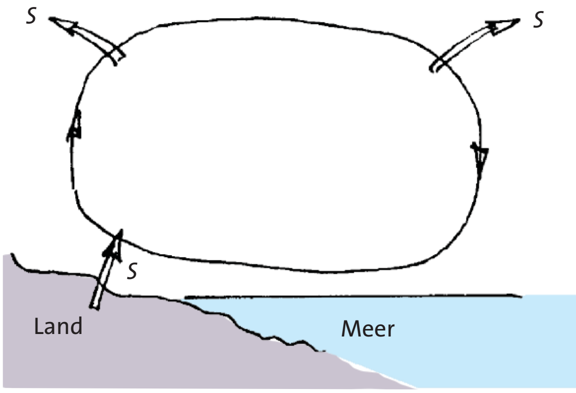


Abb. 13.15 Das Land wird durch die Sonne stark aufgeheizt, das Meer nur schwach. Es entsteht eine Konvektionsströmung.

Temperaturunterschiede, die zu unterschiedlichem Aufheizen der Luft führen, bestehen nicht nur zwischen Land und Meer, sondern auch an vielen anderen Stellen der Erdoberfläche. Immer wenn die Erde an einer Stelle wärmer ist als in der Umgebung, entsteht ein Aufwind, wo sie kälter ist, ein Abwind.

Die Aufwinde, die an den warmen Orten entstehen (die sogenannten Thermiken), werden gern von Vögeln und Segelfliegern zum Aufsteigen genutzt.

Auch die Passatwinde sind ein Beispiel einer thermischen Konvektionsströmung, Abb. 13.16. In der Äquatorgegend wird die Luft stark aufge-

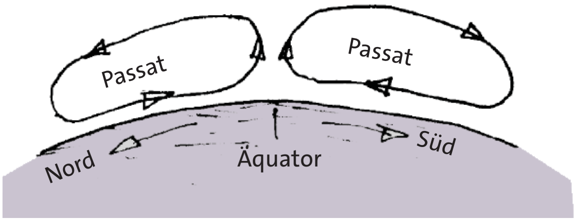


Abb. 13.16 Zur Entstehung der Passatwinde

heizt. Sie steigt nach oben, strömt in der Höhe nach Süden und nach Norden, d. h. in Gebiete, wo es kälter ist. In der Gegend des 30. Breitengrades (nördlich und südlich) sinkt sie wieder ab und strömt unten zurück zum Äquator. Diese Rückströmung in Richtung Äquator ist der Passatwind.

Wir wollen die thermische Konvektion unter einem weiteren Gesichtspunkt betrachten. Luft nimmt in niedriger Höhe Entropie auf und steigt nach oben. Nun nimmt die Temperatur der Luft nach oben hin ab, weil sich die Dichte der Luft vermindert. Sie gibt nach und nach Entropie ab, da sie nach wie vor eine höhere Temperatur hat als ihre jeweilige Umgebung. Die Entropie gibt sie jedoch auf einer niedrigeren Temperatur ab als der, bei der sie sie aufgenommen hatte.

Mit der Luft passiert demnach dasselbe wie mit dem Arbeitsgas in einem Wärmemotor: Aufnahme von Entropie auf hoher Temperatur, Abgabe auf niedriger. Man kann daher jede thermische Konvektionsströmung als Wärmemotor auffassen. Dabei wird keine Welle in Drehung versetzt, sondern es wird nur die Luft bewegt.

Schließlich holt man die Energie oft aus der bewegten Luft heraus: in Windrädern und mit Segelschiffen. Aus der Konvektionsströmung in einem Zimmer kann man Energie zum Beispiel mit einer Weihnachtsmühle herausholen.

Aufgaben

1. Flüssigkeiten dehnen sich bei Entropiezufuhr nur sehr wenig aus. Die geringe Ausdehnung reicht aber aus, thermische Konvektionsströmungen in Gang zu setzen. Nenne ein Beispiel. An welcher Stelle wird der Flüssigkeit die Entropie zugeführt, an welcher Stelle wird sie ihr entnommen?
2. Warum geht die Flamme einer Kerze, vom Docht aus gesehen, nach oben und nicht nach unten?

14 LICHT

14.1 Entropietransport durch den luftleeren Raum

Ein heißer Gegenstand wird normalerweise von selbst kalt, seine Entropie fließt in die Umgebung ab: in die Luft und in die Unterlage, auf der er steht. Wir wollen dieses Abkühlen verhindern. Sehr einfach, könnte man denken: Wir bringen den Gegenstand ins Vakuum, Abb. 14.1. Durch die Luft kann die Entropie nicht mehr entweichen. Außerdem haben wir den Gegenstand, den wir im Folgenden kurz G nennen wollen, an langen, dünnen Fäden aufgehängt, die ein sehr geringes Wärmeleck darstellen.

Man beobachtet nun etwas Merkwürdiges: Erstens wird die Vakuumglocke deutlich spürbar warm, und zweitens kühlt sich der Gegenstand G ab (was wir feststellen können, wenn wir G wieder aus der Vakuumglocke herausholen). In anderen Worten: Die Entropie ist von dem heißen Gegenstand weggekommen, obwohl keine wärmeleitende Verbindung vorhanden war.

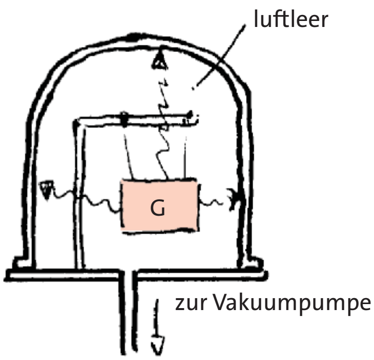


Abb. 14.1 Der Gegenstand G kühlt sich ab, obwohl seine Umgebung luftleer ist.

Man könnte den Versuch im Prinzip auch so machen: Man bringt G in den luftleeren Weltraum. Hier würde er sich ebenfalls abkühlen.

Die Entropie muss also durch irgendeine unsichtbare Verbindung oder mit einem unsichtbaren Träger durch den luftleeren Raum hindurchgehen können. Worin diese Verbindung besteht, wer der Träger ist, entdeckt man nun leicht, wenn man G noch etwas stärker erhitzt, nämlich so stark, dass er glüht. Wenn er glüht, sendet er etwas aus, das wir alle kennen: Licht. Und Licht geht sogar besonders gut durch den luftleeren Raum hindurch. Es durchquert zum Beispiel die 150 Millionen Kilometer zwischen Sonne und Erde fast ohne Verluste. Das Licht, das von einem strahlenden Gegenstand ausgeht, trägt auch Entropie. Der strahlende Gegenstand gibt daher ständig Entropie ab.

Damit ist allerdings unser Problem noch nicht ganz gelöst. Der Gegenstand G, den wir anfangs betrachtet hatten, glühte ja gar nicht. Er strahlte also gar kein Licht aus. Oder doch?

Wir müssen zunächst noch einiges über das Licht in Erfahrung bringen.

14.2 Lichtsorten

Man schickt einen dünnen Strahl von Sonnenlicht oder Licht einer starken Glühlampe oder einer Bogenlampe auf ein Glasprisma und lässt es ein Stück hinter dem Prisma auf einen weißen Schirm fallen. Was man dort sieht, ist nicht ein weißer Fleck, wie man es vielleicht erwartet hätte, sondern ein bunter Streifen, ein Spektrum, Abb. 14.2.

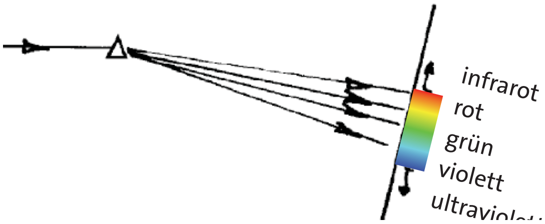


Abb. 14.2 Weißes Licht wird durch ein Glasprisma in seine Bestandteile zerlegt.

Das Licht der Sonne und der Lampen besteht aus vielen verschiedenen Lichtsorten. Diese verschiedenen Lichtarten rufen in unseren Augen verschiedene Farbempfindungen hervor. Falls alle Lichtsorten miteinander gemischt in unsere Augen gelangen, empfinden wir „weiß“.

Das Prisma lenkt diese verschiedenen Lichtsorten verschieden stark ab, es zerlegt das Licht. Das rote Licht wird vom Prisma am wenigsten abgelenkt. Es folgt das orange, das gelbe, das grüne und das blaue Licht. Das violette Licht schließlich wird am stärksten abgelenkt.

Das Licht, das wir mit den Augen wahrnehmen können, ist nur ein sehr kleiner Ausschnitt aus der Menge aller Lichtsorten, die in der Natur vorkommen und die man mit technischen Mitteln herstellen kann. Es gibt außer dem sichtbaren Licht viele andere Lichtsorten, für die wir aber kein Sinnesorgan haben. Man nennt alle diese Strahlungsarten, sichtbare wie unsichtbare, elektromagnetische Strahlung.

Auch Sonnenlicht und Lampenlicht enthalten unsichtbare Strahlung, und sie wird ebenfalls durch das Prisma abgelenkt. Man kann sie mit speziellen Messgeräten nachweisen. Man stellt fest, dass es „Licht“ gibt, das stärker abgelenkt wird als das violette Licht. Diese Strahlung nennt man ultraviolette Strahlung. Und es gibt „Licht“, das weniger abgelenkt wird als das rote Licht: die Infrarotstrahlung.

Welche Lichtsorten ein Körper ausstrahlt und wie viel davon, hängt von seiner Temperatur ab. Ein Körper strahlt pro Sekunde umso mehr Licht ab, je heißer er ist, d. h., je höher seine Temperatur ist. Erst bei einer Temperatur von 0 K hört er auf zu strahlen.

Außerdem verschiebt sich die Zusammensetzung der Strahlung, wenn sich die Temperatur des strahlenden Körpers ändert. Die Sonne hat an ihrer Oberfläche eine Temperatur von etwa 5 800 K. Das Licht, das sie abstrahlt, ist zum überwiegenden Teil sichtbares Licht. Der Glühfaden einer Glühlampe hat eine Temperatur von etwa 3 000 K. Bei ihm ist der Anteil des Infrarotlichts im Verhältnis zum sichtbaren sehr viel größer. Hat der strahlende Körper eine Temperatur von etwa 1100 K ($\approx$ 800 °C), so ist er rotglühend. Vom sichtbaren Licht ist nur noch rotes Licht übriggeblieben, das meiste Licht ist Infrarotlicht. Unter 900 K ($\approx$ 600 °C) sendet ein Gegenstand nur noch Infrarotlicht aus.

> Ein Körper sendet umso mehr elektromagnetische Strahlung aus, je höher seine Temperatur ist.
>
> Bei der Temperatur der Sonnenoberfläche (5800 K) besteht der größte Teil der Strahlung aus sichtbarem Licht. Je niedriger die Temperatur des strahlenden Körpers ist, desto geringer wird der Anteil des sichtbaren und desto größer der Anteil des infraroten Lichts. Unterhalb 900 K sendet er nur noch infrarotes Licht aus.

14.3 Entropie- und Energietransport mit Licht

Wir kommen zurück zu unserem Körper G, der sich im Vakuum abkühlt. Wir haben festgestellt, dass G sichtbares oder unsichtbares Licht abgibt, das das Vakuum durchqueren kann. Die Entropie, die G offensichtlich abgibt — denn er kühlt sich ab —, muss also von dem Licht mitgenommen werden.

Nun wissen wir schon lange, dass Entropie ein Energieträger ist. Immer, wenn irgendwo Entropie fließt, fließt auch Energie. Der sich abkühlende Körper gibt also mit dem Licht sowohl Entropie als auch Energie ab.

> Licht (sichtbares und unsichtbares) transportiert Entropie und Energie.

Aufgrund der Überlegungen, die wir gerade angestellt haben, könnte man zu einem Trugschluss kommen. Wenn jeder Körper Entropie abstrahlt, solange seine Temperatur größer als 0 Kelvin ist, sollte er sich doch, falls er sich im Vakuum befindet, immer weiter abkühlen — bis er schließlich auf 0 K angelangt ist. Das passiert aber nicht. Im Gegenteil: Bringt man den Körper G auf eine Temperatur, die kleiner ist als die Umgebungstemperatur, und bringt ihn ins Vakuum (wie in Abb. 14.1), so kühlt er sich nicht ab, sondern er erwärmt sich sogar.

Er erwärmt sich, obwohl er Entropie abgibt. Wie ist das zu erklären? Wir haben vergessen etwas zu berücksichtigen: Nicht nur unser Gegenstand G strahlt, sondern ebenso alle Gegenstände der Umgebung. G gibt mit der Strahlung, die er aussendet, Entropie ab — aber er bekommt auch Entropie, nämlich mit der Strahlung, die die Körper in seiner Umgebung aussenden. Ist die Temperatur von G höher als die der Umgebung, so gibt er mehr Entropie an die Umgebung ab als er von ihr empfängt, Abb. 14.3a. Ist seine Temperatur niedriger als die der Körper, die sich um ihn herum befinden, so bekommt er mehr Entropie als er abgibt, Abb. 14.3b.

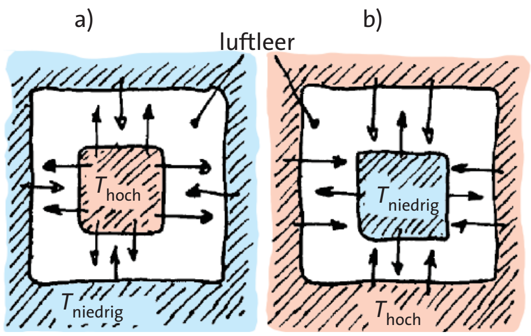


Abb. 14.3 Auch im luftleeren Raum stellt sich thermisches Gleichgewicht zwischen den Körpern ein.

In beiden Fällen geht also der „Nettoentropiestrom“ von der hohen zur niedrigen Temperatur. Und in beiden Fällen ist der Endzustand derselbe: Die Temperaturen gleichen sich an, es stellt sich thermisches Gleichgewicht ein.

> Auch wenn der Entropietransport mit elektromagnetischer Strahlung erfolgt, fließt der (Netto-) Entropiestrom von Stellen hoher zu Stellen niedriger Temperatur.

Aufgabe

1. Ein Körper K wird zwischen zwei parallele Wände A und B gebracht, die sich auf den Temperaturen T_A bzw. T_B befinden, Abb. 14.4. T_A sei größer als T_B. a) Was lässt sich über die Temperatur sagen, die K annimmt? b) Was lässt sich über die Energieströme zwischen den Wänden untereinander und zwischen den Wänden und K sagen?

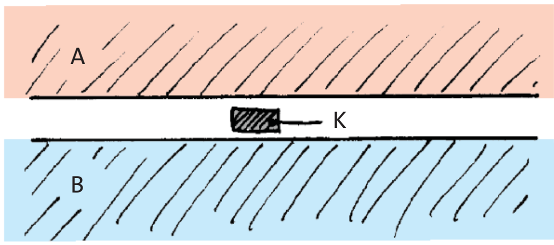


Abb. 14.4 Zur Aufgabe 1

14.4 Die Temperatur des Lichts

Licht, das von einem Körper ausgesendet wird, hat dieselbe Temperatur wie der Körper selbst. So hat das Licht, das von der Oberfläche der Sonne kommt, die Temperatur der Oberfläche der Sonne, nämlich etwa 5 800 K. Diese Aussage klingt zunächst nicht sehr plausibel: Wenn Sonnenlicht diese Temperatur hat — müsste dann nicht alles, was der Sonnenstrahlung ausgesetzt ist, sofort verbrennen? Und wenn Sonnenlicht diese Temperatur hat, dann müsste man sie messen können, indem man ein Thermometer ins Sonnenlicht stellt.

Um dieses Problem zu lösen, müssen wir uns etwas genauer mit der Frage befassen, wie man mit einem Thermometer umgeht. Um die Temperatur von einem Gegenstand oder einem Stoff zu messen, muss der Gegenstand oder der Stoff in

Kontakt mit dem Thermometer gebracht werden. Wenn man nun ein Thermometer in die Sonnenstrahlung hält, so ist das Thermometer zwar mit dem Sonnenlicht in Kontakt – das Sonnenlicht „berührt" das Thermometer –, aber das Thermometer wird noch von anderen Dingen berührt. Da ist zunächst die Luft, die das Thermometer berührt. Wessen Temperatur wird das Thermometer anzeigen? Die der Luft oder die der Sonnenstrahlung? Das Thermometer wird einen Kompromiss machen und eine Temperatur anzeigen, die weder die der Luft noch die des Sonnenlichts ist.

Man kann sich dadurch zu helfen versuchen, dass man das Thermometer in einem durchsichtigen, luftleer gepumpten Behälter unterbringt. Der Temperaturwert, den es nun anzeigt, ist immer noch weit entfernt von den erwarteten 5 800 K. Der Grund dafür: Wir haben noch etwas anderes übersehen. Tatsächlich macht das Thermometer wieder einen Kompromiss: Außer mit dem Sonnenlicht steht das Thermometer im Wärmekontakt mit der Infrarotstrahlung aus der Umgebung. Diese Strahlung hat die Temperatur der Umgebung, d. h. etwa 300 K. Und während die Sonnenstrahlung nur aus einem sehr kleinen Winkelbereich auf das Thermometer fällt, kommt das 300-K-Licht aus einem großen Winkelbereich, Abb. 14.5. Es ist also ganz normal, dass auch diesmal die Messung sehr zu Gunsten der Umgebungstemperatur ausgeht.

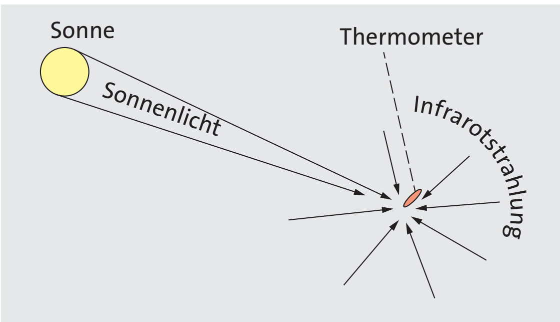


Abb. 14.5 Das Sonnenlicht kommt nur aus einem kleinen Bereich von Richtungen. Aus allen anderen Richtungen kommt Infrarotlicht der Temperatur 300 K.

Wie kann man nun die Temperatur des Sonnenlichts messen? Man muss dafür sorgen, dass Sonnenlicht nicht nur aus einem engen Bereich von Richtungen auf das Thermometer trifft, sondern aus allen Richtungen, und das erreicht man mithilfe von Linsen oder Spiegeln, Abb. 14.6. Wenn, vom Thermometer aus, die Sonne in allen Richtungen zu sehen ist, so wird es die Temperatur der Sonne anzeigen. (Unsere normalen Thermometer sind hierfür natürlich nicht mehr geeignet.)

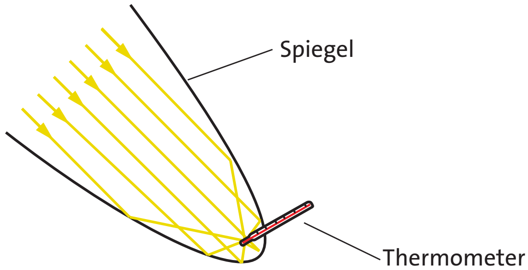


Abb. 14.6 Der Parabolspiegel sorgt dafür, dass Sonnenlicht aus allen Richtungen auf das Thermometer fällt.

Du weißt, dass man mit einer Linse – einem Brennglas, wie man auch sagt – sehr hohe Temperaturen erzeugen kann, indem man das Sonnenlicht auf einen kleinen Fleck, etwa auf einem Stück Holz, konzentriert. Man kann diesen Vorgang so beschreiben: Man versucht, das Holz von allen Seiten dem Sonnenlicht auszusetzen, sodass das Holz die Temperatur des Sonnenlichts annimmt. Tatsächlich kommt bei einem gewöhnlichen Brennglas das Sonnenlicht nicht aus allen Richtungen auf das Holz, sondern aus einem immer noch beschränkten Bereich. Das Holz erreicht also eine recht hohe Temperatur, aber doch noch längst nicht die der Sonne.

14.5 Entropie- und Energiebilanz der Erde

Die Erde bekommt von der Sonne mit dem Licht ständig Entropie, und damit Energie.

Die Stärke des Energiestroms, der von der Sonne auf einen Quadratmeter der Erde fällt, ist ein wichtiger Zahlenwert, und er lässt sich leicht merken: Er beträgt etwa 1 kW. Man sagt, die Solarkonstante betrage 1 kW pro m^2. Die Fläche von 1 Quadratmeter, die man betrachtet, muss senk-

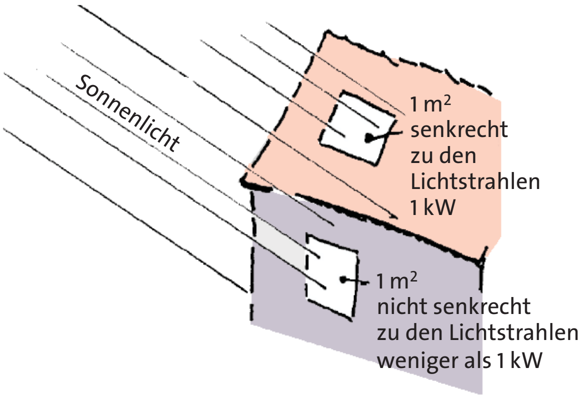


Abb. 14.7 Auf eine 1 m^2 große Fläche, die senkrecht zur Richtung des Sonnenlichts steht, trifft ein Energiestrom von 1 kW.

recht zur Richtung des Sonnenlichts stehen, Abb. 14.7. Steht sie schräg, so empfängt sie natürlich weniger als 1 kW. Außerdem gilt dieser Wert der Solarkonstante nur für unbewölkten Himmel.

Solarkonstante: 1 kW/m^2

Wenn nun die Erde keine Entropie und keine Energie abgäbe, würde sie sich immer mehr erwärmen – und das tut sie nicht. Wie sie es anstellt, ihre Temperatur konstant zu halten, ist klar: Da ihre Temperatur nicht 0 K ist, strahlt sie selbst Infrarotlicht ab, und mit diesem Entropie und Energie.

Während das Sonnenlicht die Erde nur von einer einzigen Seite erreicht, strahlt die Erde selbst in alle Richtungen, Abb. 14.8.

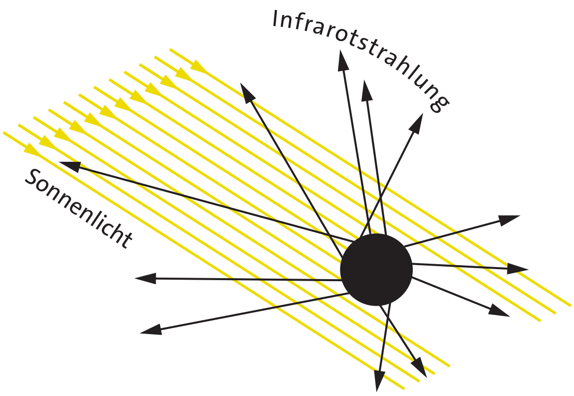


Abb. 14.8 Die Erde bekommt Sonnenlicht nur aus einem sehr engen Richtungsbereich, und sie strahlt in alle Richtungen ab.

Da sich die Erde weder erwärmt noch abkühlt, muss der auslaufende Energiestrom genauso stark sein wie der einfallende:

$$P_{\text{aus}} = P_{\text{ein}}$$

Mit der Entropie ist es nicht so einfach. Auf der Erde wird viel Entropie erzeugt. Das abgestrahlte Licht muss daher mehr Entropie tragen als das einfallende Sonnenlicht. Das abgestrahlte Infrarotlicht muss neben der von der Sonne kommenden Entropie noch die ganze auf der Erde erzeugte Entropie ins Weltall wegtragen, damit auch der Entropieinhalt der Erde konstant bleibt:

$$I_{S\,\text{aus}} = I_{S\,\text{ein}} + I_{S\,\text{erzeugt}}$$

Die Energie- und die Entropiebilanz der Erde werden durch dieselben Gleichungen beschrieben wie die entsprechenden Bilanzen des Stabes in Abb. 11.7, Abschnitt 11.3.

Man kann die Erde auch vergleichen mit einem geheizten Haus. Der Ofen des Hauses liefert ständig einen bestimmten Energiestrom und einen bestimmten Entropiestrom. Durch Wärmelecks fließt der ganze Energiestrom wieder aus dem Haus heraus. Mit dem herausfließenden Energiestrom fließt aber nicht nur die Entropie heraus, die die Heizung abgegeben hat, sondern auch die im Haus und in den Wänden erzeugte Entropie.

Dass sich der Entropiestrom, der von der Erde bzw. dem Haus wegfließt, auf einen zeitlich konstanten Wert einstellt, bedeutet, dass ein Fließgleichgewicht vorliegt.

14.6 Der Treibhauseffekt

Die Atmosphäre ist bekanntlich für sichtbares Licht durchlässig. (Andernfalls wäre es nicht nur nachts, sondern auch tagsüber dunkel.) Infrarotstrahlung dagegen lässt die Atmosphäre nur schlecht durch. Schuld daran ist im Wesentlichen das Kohlenstoffdioxid, das die Atmosphäre in kleinen Mengen enthält. Kohlenstoffdioxid – in chemischen Symbolen CO_2 – ist also eine Art Isolationsmaterial für Infrarotstrahlung. Wir wollen nun untersuchen, was passiert, wenn sich durch irgendein Ereignis der CO_2-Gehalt der Atmosphäre erhöht.

Das einfallende Sonnenlicht bleibt davon unberührt. Die Erde wird von der Sonne geheizt wie vorher. Der Wärmeverlust dagegen wird zunächst geringer, die Strahlung kommt ja nicht mehr so gut weg wie vorher. Dadurch erhöht sich die Temperatur. Höhere Temperatur bedeutet aber wieder stärkere Abstrahlung. Die Abstrahlung nimmt also nach und nach zu — und zwar so lange, bis sie wieder den alten Wert erreicht hat; bis einfallender und wegfließender Energiestrom wieder gleich stark sind. Der neue Fließgleichgewichtszustand unterscheidet sich vom alten (bevor der CO_2-Gehalt erhöht wurde) in der Temperatur: Die Temperatur ist höher geworden.

> Je höher der CO_2-Gehalt der Atmosphäre ist, desto höher ist die mittlere Temperatur, die sich auf der Erde einstellt.

Zur Verdeutlichung vergleichen wir die Erde noch einmal mit dem geheizten Haus. Verbessert man die Isolation des Hauses, heizt aber genauso weiter wie vorher, so stellt sich im Haus eine höhere Temperatur ein. Bei dieser höheren Temperatur ist der Energiestrom, der durch Wärmelecks nach außen fließt, wieder genauso stark, wie der Energiestrom, der von den Heizkörpern abgegeben wird.

Der CO_2-Gehalt der Atmosphäre beträgt etwa 0,03 % (0,03 % der Moleküle der Luft sind CO_2-Moleküle). Im Augenblick nimmt dieser CO_2-Anteil an der Luft stark zu: Bei der Verbrennung von Kohle in Kraftwerken, von Heizöl in den Zentralheizungen der Häuser und von Treibstoffen (Benzin und Dieselöl) in den Automotoren entsteht CO_2. Kohlenstoffdioxid wird von den Pflanzen abgebaut. Dabei produzieren sie Sauerstoff. Dieser CO_2-Abbau durch die Pflanzen nimmt aber zur Zeit ab, da immer neue Bereiche des tropischen Regenwaldes abgeholzt werden. Es ist daher damit zu rechnen, dass die Temperatur der Erde in den nächsten Jahrzehnten zunimmt. Auch wenn diese Zunahme nur wenige °C beträgt, kann sie schwere Folgen nach sich ziehen. So werden Teile des polaren Eises schmelzen. Dadurch würde der Meeresspiegel ansteigen, und das Meer würde Landgebiete überfluten.

Die Erscheinung, dass die Atmosphäre das Sonnenlicht ungehindert durchlässt, die von der Erdoberfläche ausgesendete Infrarotstrahlung aber nicht, nennt man den Treibhauseffekt. In Treibhäusern oder Gewächshäusern spielt sich nämlich derselbe Vorgang ab. Allerdings übernimmt hier das Glas die Rolle der Atmosphäre. Auch Glas ist für sichtbares Licht gut durchlässig und für Infrarotlicht nicht. Es hält also die im Innern des Treibhauses entstehende Infrarotstrahlung zurück, sodass sich im Treibhaus eine höhere Temperatur einstellt, als wenn das Glas für Infrarotlicht durchlässig wäre.

Aufgabe

1. Wenn sich der CO_2-Gehalt der Erde ändert, stellt sich eine neue Temperatur auf der Erde ein. Wir hatten in Kapitel 4 eine ganz ähnliche Situation: Man hat die Luftreibung eines Körpers verändert. Dadurch hatte sich die Geschwindigkeit des Körpers auf einen neuen Wert eingestellt. Um welchen Vorgang handelt es sich? Vergleiche die beiden Erscheinungen.

15 DATEN UND DATENTRÄGER

15.1 Datentransporte

Jedes Haus steht über Leitungen und Öffnungen mit der Außenwelt in Verbindung. Auf den Abb. 15.1 und Abb. 15.2 ist ein Haus mit solchen Verbindungen im Querschnitt dargestellt. Um das Bild nicht zu unübersichtlich zu machen, wurde ein Teil der Verbindungen in Abb. 15.1, ein anderer in Abb. 15.2 dargestellt. Dabei wurden die Leitungen nach einem bestimmten Prinzip geordnet. Alle in Abb. 15.1 gezeichneten Verbindungen dienen einem gemeinsamen Zweck und alle in Abb. 15.2 dargestellten einem anderen gemeinsamen Zweck.

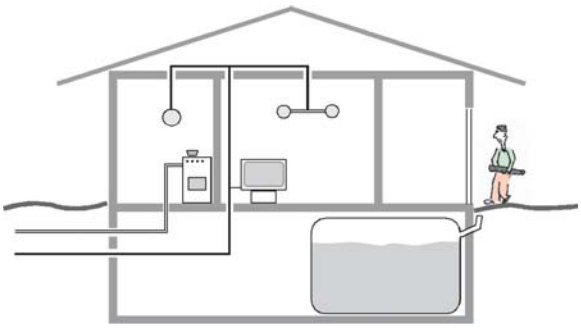


Abb. 15.1 Verbindungen, über die ein Haus mit Energie versorgt wird

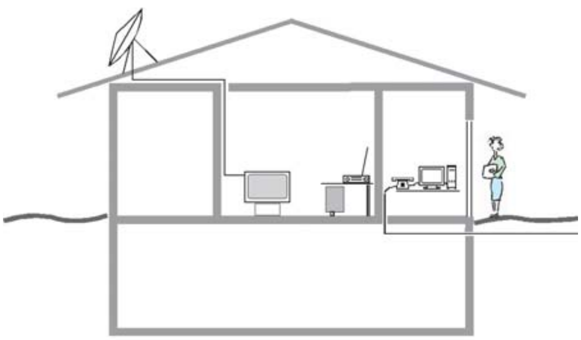


Abb. 15.2 Verbindungen, über die ein Haus mit Daten versorgt wird

Abb. 15.1 zeigt Leitungen, über die das Haus mit Energie versorgt wird:

- die elektrischen Leitungen, die über den „Stromzähler" laufen;
- die Einfüllöffnung für den Heizöltank;
- die Gasleitung.

Ein Mann trägt Holz für den Kamin ins Haus. Energie wird also manchmal auch durch die Tür ins Haus gebracht. Andere Häuser haben noch weitere Zuleitungen oder Öffnungen für die Energie:

- die Kellerluke (für Holz und Kohle);
- eine Fernwärmeleitung;
- eine Leitung, durch die warmes Wasser vom Sonnenkollektor ins Haus fließt.

Auch alle in Abb. 15.2 dargestellten Verbindungen haben einen gemeinsamen Zweck: Sie versorgen die Bewohner des Hauses mit Nachrichten, Informationen, Bildern und Musik. Wir sagen, über diese Leitungen gelangen Daten in das Haus. Im Einzelnen kommen die Daten

- über die Telefonleitung zum Telefon und zum Computer;
- über die Fernsehantennenleitung;
- mit Zeitungen und Briefen durch den Briefkastenschlitz;
- durch das Dach und die Wände hindurch mit Radiowellen, sogenannten elektromagnetischen Wellen, die von der Antenne des Transistorradios oder vom Handy aufgefangen werden;
- durch das offene Fenster, durch das der Nachbar etwas herüberruft.

Auch Daten können durch die Tür ins Haus gelangen: Die Frau hat einen USB-Stick und eine

DVD in ihrer Tasche. Weitere, im Bild nicht dargestellte Datenleitungen, die in ein Haus führen können, sind:
- die Klingelleitung;
- die Kabelfernsehleitung.

Wir hatten früher gesehen, dass für jeden Energietransport ein Energieträger gebraucht wird. Entsprechend braucht man für jeden Datentransport einen Datenträger. Im Fall des Hauses von Abb. 15.2 gelangen Daten mithilfe der folgenden Träger ins Hausinnere:
- Elektrizität;
- Schall;
- Radiowellen;
- Briefe, Zeitungen etc.

Außerdem kann Licht als Datenträger auftreten. Wenn man fernsieht, gelangen vom Bildschirm Daten mit dem Träger Licht in unsere Augen. Auch Telefongespräche werden teilweise mit Licht übertragen. Als Leitungen werden dabei anstelle der sonst üblichen Kupferdrähte Lichtleiter verwendet.

> Für jeden Datentransport wird ein Träger gebraucht. Elektrizität, Schall, Radiowellen und Licht können als Datenträger benutzt werden.

Natürlich kann jede Nachricht mit jedem beliebigen Träger transportiert werden. Die Nachricht „Schreib eine E-Mail“ wird in Abb. 15.3 mit vier verschiedenen Trägern überbracht.

Zu jedem Datentransport gibt es einen Anfang und ein Ende: die Datenquelle und den Datenempfänger. Wenn eine Person A einer anderen Person B etwas sagt, so ist A (genauer: das Stimmorgan von A) die Datenquelle und B (genauer: das Gehör von B) der Datenempfänger.

Das Wort „Quelle“ muss aber nicht bedeuten, dass hier die Daten erzeugt werden; es bedeutet lediglich, dass hier der Transport mit einem bestimmten Träger beginnt. Ebenso muss das Wort „Empfänger“ nicht bedeuten, dass der Transport hier endgültig zu Ende ist. Es bedeutet nur, dass hier der Transport mit dem gerade betrachteten Träger zu Ende ist. Die Begriffe Quelle und Empfänger beziehen

Abb. 15.3 Ein und dieselbe Nachricht wird mit verschiedenen Trägern übermittelt.

sich also stets auf den Transport mit einem bestimmten Träger.

So kommen die Nachrichten, die durch ein Telefonkabel übertragen werden, vom Mikrofon des einen Telefonapparats. Dieses Mikrofon ist für den Transport durch das Kabel (mit dem Träger Elektrizität) die Datenquelle. Der Lautsprecher im anderen Telefonapparat ist der zugehörige Datenempfänger.

Die Übertragung von Daten lässt sich genauso in einem Flussbild darstellen wie die Übertragung von Energie. Datenquelle und Datenemp-

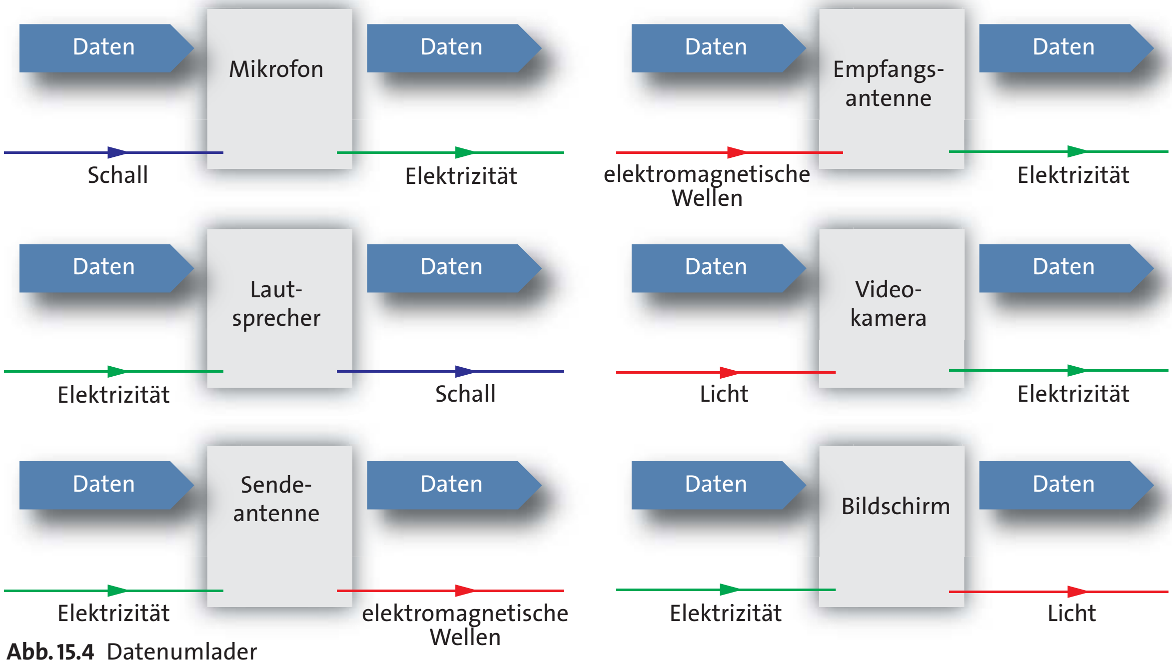


Abb. 15.4 Datenumlader

fänger werden durch je einen Kasten symbolisiert, der Datenstrom durch einen breiten und der Strom des Datenträgers durch einen dünnen Pfeil. Abb. 15.4 zeigt drei Beispiele für Datenflussbilder.

Datenquelle	Datenträger	Datemempfänger
Sendeantenne	Elektromagnet. Wellen	Empfangsantenne
Empfangsantenne	Elektrizität	Fernsehapparat
Sprechorgan	Schall	Mikrofon

Tab. 15.1

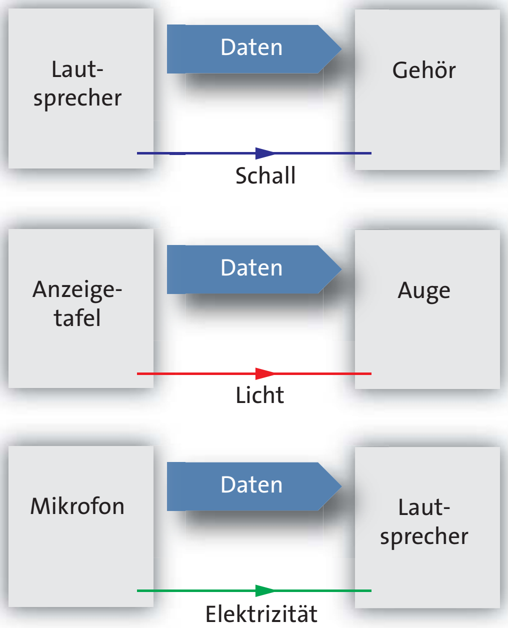


Abb. 15.5 Einige Datenflussbilder

In Tab. 15.1 sind weitere Quelle-Empfänger-Paare zusammen mit den entsprechenden Trägern aufgeführt.

An Energietransporten sind oft Geräte beteiligt, deren Aufgabe es ist, Energie von einem auf einen anderen Träger umzuladen. Das Entsprechende trifft auf Datentransporte zu: Bei Datentransporten werden Daten oft von einem auf einen anderen Träger umgeladen. Das bedeutet, dass diese Geräte Quelle und Empfänger in einem sind.

So werden in einem Lautsprecher die Daten von Elektrizität auf Schall umgeladen. Der Lautsprecher ist also Empfänger für einen Transport mit dem Träger Elektrizität und Quelle für einen Transport mit dem Träger Schall. Die symbolische Darstellung von Datenumladern liegt damit auf der Hand. Abb. 15.5 zeigt einige Beispiele.

Datentransporte

Datenumlader	Datenträger am Eingang	Datenträger am Ausgang
LCD	Elektrizität	Licht
Photodiode	Licht	Elektrizität
Autohupe, Sirene	Elektrizität	Schall
Radioapparat	elektromagnetische Wellen	Schall

Tab. 15.2

In Tab. 15.2 sind weitere Datenumlader zusammen mit den entsprechenden Trägern an Ein- und Ausgang aufgeführt.

Man sieht, dass es zu jedem Gerät, das Daten von einem Träger A auf einen Träger B umlädt, ein Gegenstück gibt, d. h. ein Gerät, das Daten von B auf A lädt. So ist das Mikrofon das Gegenstück zum Lautsprecher, und die Videokamera tut das Entgegengesetzte von dem, was ein Fernsehbildschirm tut.

Einige der Geräte von Abb. 15.5 muss man an die Steckdose anschließen, damit sie funktionieren. Sie werden über die Steckdose mit Energie versorgt. Man darf aber diesen Energieeingang nicht mit dem Dateneingang des Geräts verwechseln. Die Nachrichten und Bilder gelangen über die Antenne und das Fernsehkabel in den Fernseher hinein, nicht über die Netzsteckdose.

Genauso wie die entsprechenden Geräte für die Energie, die Energieumlader, lassen sich auch Datenumlader zu einer Kette zusammenfügen.

An vielen technischen Datentransporten sind mehrere aneinander gehängte Datenumlader beteiligt. Abb. 15.6 zeigt das (vereinfachte) Flussbild der Live-Fernsehübertragung eines Fußballspiels von Mexiko in die Bundesrepublik.

Nach den bisher betrachteten Beispielen sieht es so aus, als müsste das letzte Glied jeder Datenumladerkette ein Mensch sein. Diese Vermutung ist aber nicht richtig. Es gibt Datentransporte, bei denen weder am Anfang noch am Ende eine Person steht. Das ist z. B. bei Regelvorrichtungen der Fall. Für die Temperaturregelung der Wohnung befindet sich in einem der Zimmer ein Temperaturfühler, die Datenquelle. Dieser teilt dem Heizkessel mit, ob mehr oder weniger Heizöl verbrannt werden soll. Der Heizkessel ist hier der Datenempfänger. Datenträger ist in diesem Fall die Elektrizität.

Wenn am Ende einer Datenumladerkette ein Mensch steht, genauer: seine Augen oder sein Gehör, so benutzt man statt des Wortes Daten meist andere Wörter: Nachrichten, Informationen, Texte, Musik, Bilder, Lärm,… Für den Prozess der Übertragung ist es aber gleichgültig, wer der Adressat ist und welche Bedeutung die Daten für ihn haben. Wir benutzen daher in allen Fällen das Wort „Daten".

Wir haben gesagt, „Licht, Elektrizität, Schall und Radiowellen können als Datenträger benutzt werden", und nicht „Licht usw. sind Datenträger".

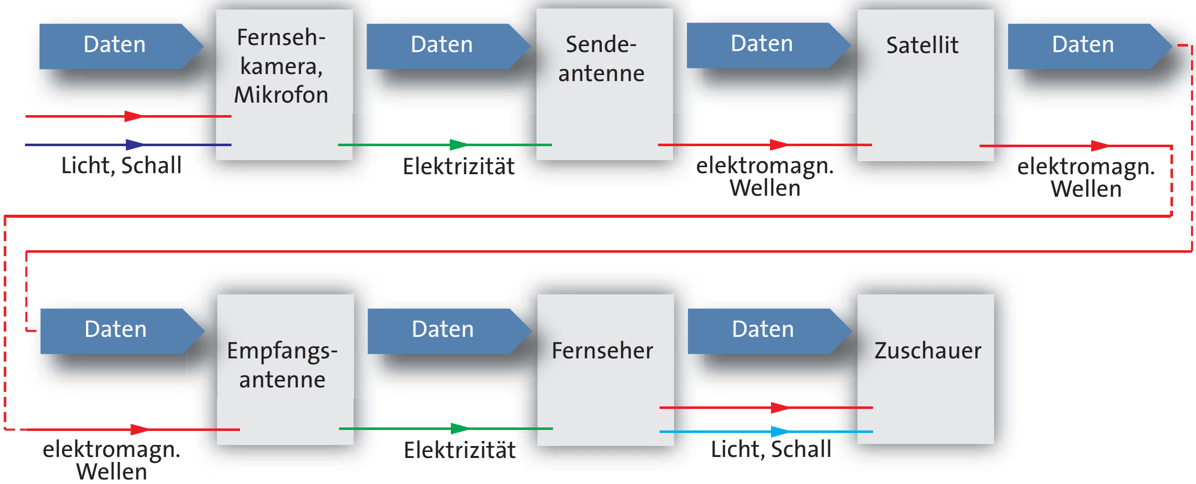


Abb. 15.6 Datentransport, bei dem die Daten fünfmal umgeladen werden

Ob diese Größen oder Stoffe als Datenträger oder ob sie als Energieträger zu bezeichnen sind, hängt nämlich nur davon ab, was man mit ihnen macht.

So wird man das Licht, das auf einen Sonnenkollektor fällt, als Energieträger bezeichnen und ebenso das Laserlicht, mit dem man ein feines Loch bohrt. Das Licht, das zur Übertragung einer Fernsehsendung durch einen Lichtleiter geht, spielt dagegen die Rolle eines Datenträgers. Auch in diesem letzteren Fall transportiert das Licht natürlich Energie, aber dieser Energietransport ist für die Anwendung nicht wesentlich.

Ähnlich ist es bei der Elektrizität. Die Elektrizität, die in dem Kabel von Abb. 15.1 in das Haus fließt (genauer: durch das Haus), dient dem Energietransport; sie spielt hier die Rolle eines Energieträgers. In der Telefonleitung und in der Antennenleitung von Abb. 15.2 dagegen ist ihre technische Funktion die eines Datenträgers.

Ein weiteres Beispiel stellen Mikrowellen dar: Im Mikrowellenherd werden sie als Energieträger benutzt, beim Radar als Datenträger.

Die Druckwelle, die bei einer Sprengung Felsbrocken durch die Gegend schleudert, ist ein Beispiel für eine Schallwelle, die als Energieträger benutzt wird. Wir sind aber mehr daran gewöhnt, Schall als Datenträger zu verwenden.

Sogar die Zeitung, die man eigentlich als Datenträger kauft, endet oft als Energieträger, nämlich beim Feuermachen.

Aufgaben

1. Zeichne drei verschiedene Datenflussbilder mit Quelle und Empfänger. (Wähle andere Beispiele als die in Abb. 15.4.)
2. Nenne drei verschiedene Geräte, die Daten mit dem Träger Schall abgeben.
3. Nenne drei verschiedene Geräte, die Daten mit dem Träger Licht bekommen.
4. Fernsehgeräte haben eine drahtlose Fernbedienung. Welcher Träger wird hier für die Datenübertragung zwischen Steuergerät und Fernsehgerät verwendet?
5. In Abb. 15.7 fehlen die Namen der Datenträger an den Ein- und Ausgängen der beiden Umlader. Vervollständige die Abbildung.
6. Trage in Abb. 15.8 die Namen der Datenumlader ein.
7. Zeichne eine Umladerkette, an der mindestens vier Umlader beteiligt sind. (Wähle ein anderes Beispiel als das in Abb. 15.6.)

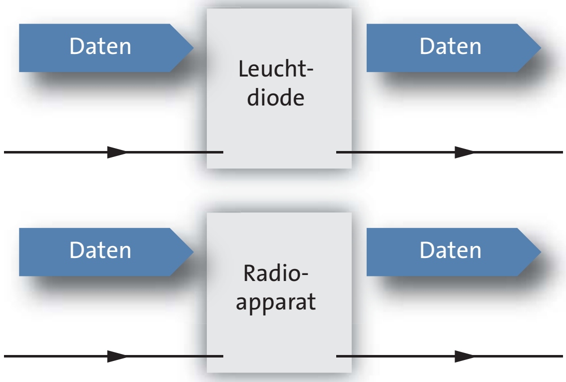


Abb. 15.7 Welches sind die Datenträger an Ein- und Ausgang?

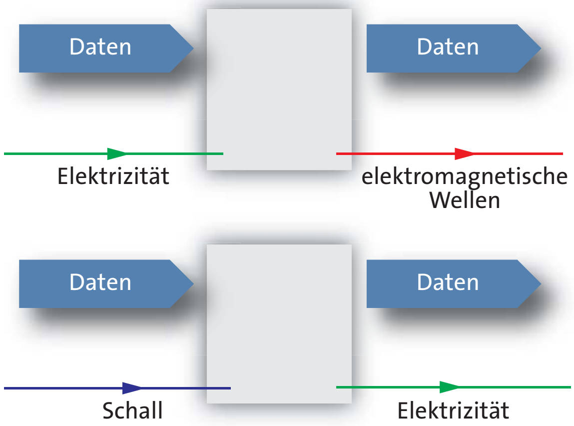


Abb. 15.8 Um welche Datenumlader handelt es sich?

15.2 Die Datenmenge

A spricht mit B und C mit D. A und B sprechen schnell, C und D langsam. Zwischen A und B gehen dann in derselben Zeit mehr Daten hin und her als zwischen C und D.

Man kann diese Aussage machen, obwohl A und B über etwas ganz anderes sprechen als C und D, denn man vergleicht hier nicht die Bedeutung, sondern nur die Menge des Gesprochenen, die Datenmenge. Im vorliegenden Fall ist ein solcher Vergleich sehr einfach, aber oft stellt sich das Problem in einem schwierigeren Zusammenhang:

- Enthält ein einseitiges Fax mehr oder weniger Daten als ein einminütiges Telefongespräch?
- Ist die Datenmenge, die jemand innerhalb ei-

ner Minute aus dem Internet holt, größer oder kleiner als die, die bei einem fünfminütigen Telefongespräch übertragen wird?

Um diese Fragen zu beantworten, müssen wir Datenmengen messen können. Wir werden im Folgenden ein Mengenmaß für Daten kennen lernen. Wir kürzen diese neue Größe Datenmenge mit dem Buchstaben *H* ab. Die Maßeinheit der Datenmenge ist das bit.

Wir werden damit zum Beispiel angeben können, wie viel bit übertragen werden, wenn man eine Minute lang telefoniert, eine Stunde lang fernsieht oder fünf Minuten lang Rauchzeichen erzeugt.

Wie wir später noch sehen werden, hat dieses Mengenmaß eine große praktische Bedeutung: Daten übertragen und Daten speichern kostet Geld, und der Preis für die Übertragung bzw. den Speicher hängt von der Datenmenge ab, also von der Bit-Zahl.

Um zu sehen, was man unter einem bit versteht, betrachten wir ein sehr einfaches Beispiel einer Datenübertragung.

Willy und Lilly planen für nächsten Sonntag eine Radtour. Sie brauchen dazu die Erlaubnis ihrer Eltern. Willy hat die Erlaubnis schon, aber Lillys Eltern kommen erst am Samstag spät abends nach Hause. Lilly möchte aber Willy noch am Abend mitteilen, ob es klappt oder nicht, — allerdings ohne das Handy oder den Computer zu benutzen. Die Häuser, in denen die beiden wohnen, sind etwa 300 m voneinander entfernt, und die Fenster ihrer Zimmer befinden sich in Sichtweite. Wie kann Lilly Willy noch am Samstagabend mitteilen, ob aus der Radtour etwas wird?

Sie haben eine Idee. Sie verabreden, sich mit einer Taschenlampe, die man auf Rot und Grün stellen kann, zu verständigen: Um Punkt 10 Uhr gibt Lilly ein grünes Lichtzeichen, wenn sie mitfahren darf, und ein rotes, wenn sie nicht mitfahren darf.

Diese Art der Datenübertragung bewährt sich, und Willy und Lilly benutzen sie bei anderen Gelegenheiten wieder. Am nächsten Sonntagabend zum Beispiel soll Lilly von Willy über den Ausgang eines Tennisendspiels informiert werden, das im Fernsehen übertragen wird, das sie sich aber nicht ansehen darf.

So verständigen sich Willy und Lilly über die verschiedensten Angelegenheiten. Nun bemerkt Bob, der in einem anderen Haus wohnt, dass sich Willy und Lilly gegenseitig Nachrichten übermitteln. Was kann Bob über diesen Vorgang aussagen? Er kann bestimmt nicht sagen, was der Inhalt der übertragenen Nachrichten ist. Er kann aber sehr wohl sagen, dass jede Nachricht so beschaffen ist, dass sie eine Auswahl aus zwei möglichen Nachrichten darstellt: Es werden ja nur zwei Zeichen verwendet.

Die Datenmenge, die jedes Mal, wenn sich Willy und Lilly über irgendetwas verständigen, übermittelt wird, ist immer gleich groß: Sie beträgt 1 bit.

Man kann diesen Sachverhalt auch so beschreiben: Zwischen Datenquelle und Datenempfänger wird eine Frage vereinbart, auf die es nur die Antworten „ja“ oder “„nein“ gibt, also z. B.:

„Darfst du die Radtour machen?“

„Hat XY das Finale gewonnen?“

Wir nennen solche Fragen Ja-Nein-Fragen. Wir können also zusammenfassen:

> 1 bit ist die Datenmenge, die mit der Antwort auf eine Ja-Nein-Frage übertragen wird.

Natürlich ist es egal, was für Zeichen man zur Beantwortung der Frage benutzt. Man kann einfach die beiden Wörter „ja“ und „nein“ benutzen. Genauso gut kann man aber auch einen grünen und einen roten Lichtblitz verwenden, einen blauen und einen weißen oder einen kurzen und einen langen. Oder man kann die Nachricht elektrisch über eine zweiadrige Leitung übertragen, etwa mithilfe der beiden Zeichen „Strom eingeschaltet“ und „Strom ausgeschaltet“.

Es ist wichtig sich klar zu machen, dass die Datenmenge unabhängig vom Inhalt der Ja-Nein-Frage ist. Ob es bei der Frage um eine Nichtigkeit geht oder um etwas ungeheuer Wichtiges — die Antwort trägt immer 1 bit.

Wir kommen noch einmal auf Willy und Lilly zurück. Der Datenverkehr zwischen den beiden nimmt immer mehr zu, und schließlich passiert es, dass Willy an einem Abend gleich mehrere Ja-Nein-Fragen zu beantworten hat. Man verabredet daher, dass das Lichtzeichen für die erste Frage um

22:00 h abgeschickt wird, das Lichtzeichen für die zweite Frage um 22:05 h und das für die dritte um 22:10 h. Da mit jedem Zeichen ein bit übermittelt wird, ergibt das an diesem Abend zusammen 3 bit. Wir werden nun sehen, wie man mehrere bit auch mit einem einzigen Zeichen übertragen kann.

Nicht jede Nachricht lässt sich als Antwort auf eine Ja-Nein-Frage darstellen – im Gegenteil: auf die meisten Fragen sind mehr als nur zwei Antworten möglich. Diese Erfahrung müssen auch Willy und Lilly machen.

Im Fernsehen wird an zwei aufeinander folgenden Tagen ein spannender zweiteiliger Krimi gezeigt. Nach dem ersten Teil steht fest, dass eine der folgenden vier Personen einen Mord begangen hat:

- die Putzfrau
- der Briefträger
- die Schwester der Ermordeten
- der Ehemann der Ermordeten.

Willy und Lilly sind gespannt, wer sich als Täter herausstellen wird. Leider muss nun Lilly erfahren, dass am Abend des folgenden Tages ihre Tante zu Besuch kommen will und daher der Fernseher abgeschaltet bleiben soll. Willy muss ihr daher irgendwie mitteilen, wer der Täter ist.

Dabei gibt es allerdings ein Problem: Auf die Frage „Wer ist der Mörder?“ sind nicht zwei, sondern vier Antworten möglich. Das Problem wird aber schnell gelöst. Willy schlägt das folgende Verfahren vor: Es soll eine blaue Farbfolie beschafft werden, sodass er mit seiner Taschenlampe Licht vier verschiedener Farben erzeugen kann – rotes, grünes, blaues und weißes –, und man vereinbart die folgende Zuordnung:

- Putzfrau: grün
- Briefträger: rot
- Schwester: weiß
- Ehemann: blau

Eine solche Vereinbarung nennt man einen Code. Willys Verfahren würde zwar sicher funktionieren, aber Lilly hat noch eine andere Idee: „Wir kommen auch mit zwei Farben aus. Du musst mir dann aber zwei Zeichen nacheinander übermitteln. Mit dem ersten sagst du, ob es ein Mann oder eine Frau war und mit dem zweiten, ob der Täter mit der Ermordeten verwandt ist oder nicht.“ Lilly's Code sieht also so aus:

- Putzfrau: grün – grün
- Briefträger: rot – grün
- Schwester: grün – rot
- Ehemann: rot – rot

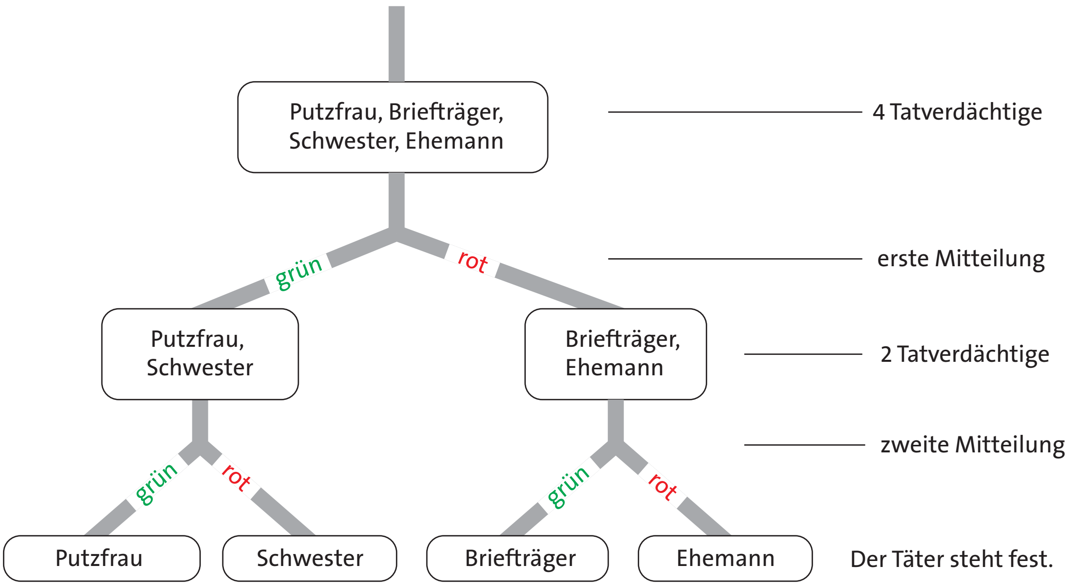


Abb. 15.9 Der Entscheidungsbaum zeigt, dass die Frage nach dem Mörder auf zwei Ja-Nein-Fragen zurückgeführt werden kann.

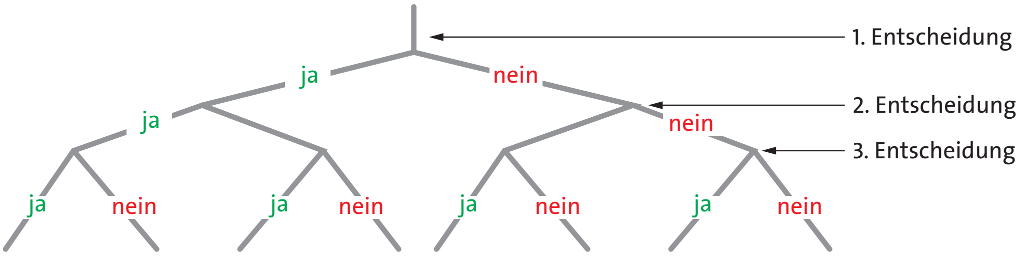


Abb. 15.10 Entscheidungsbaum für drei aufeinander folgende Ja-Nein-Fragen

Einen solchen Code, bei dem nur zwei verschiedene Zeichen verwendet werden, nennt man einen Binärcode.

Willy und Lilly sind dabei, einen wichtigen Lehrsatz der Datentechnik zu entdecken. Wir wollen diesen Lehrsatz im Folgenden allgemeiner formulieren. Zunächst stellen wir Lillys Methode graphisch dar, wir zeichnen einen Entscheidungsbaum, Abb. 15.9.

Die Frage „Wer ist der Mörder?", auf die vier Antworten möglich sind, wird zurückgeführt auf zwei Fragen mit je zwei Antworten, d. h. auf zwei Ja-Nein-Fragen. Jede der übermittelten Antworten auf diese beiden Ja-Nein-Fragen trägt ein bit. Insgesamt wird also die Datenmenge $H = 2$ bit übertragen.

Nun haben wir aber gesehen, dass man die Nachricht, wer der Täter ist, auch mit einem einzigen Zeichen übertragen kann, nämlich dann, wenn man statt zwei verschiedener Farben vier zur Auswahl hat. Hieraus ergibt sich:

> Eine Quelle, die über vier verschiedene Zeichen verfügt, sendet dem Empfänger mit einem Zeichen die Datenmenge $H = 2$ bit zu.

Unsere bisherigen Überlegungen zeigen, dass es von der Zeichenzahl der Quelle abhängt, wie viel bit mit jedem Zeichen übertragen werden. Bei einer Zeichenzahl von 2, d. h. bei einem Binärcode, wird mit jedem Zeichen 1 bit ausgesendet, bei einer Zeichenzahl von 4 sind es 2 bit pro Zeichen.

Es ist nun nicht mehr schwer herauszufinden, wie viel bit pro Zeichen transportiert werden, wenn für die Übertragung noch mehr unterschiedliche Zeichen verwendet werden: Man macht einfach eine Binärkodierung, d. h. man zerlegt die Übertragung in aufeinander folgende Ja-Nein-Übertragungen.

Abb. 15.10 zeigt, wie man eine Antwort, die aus 8 möglichen Antworten ausgewählt wird, mit 3 Antworten auf Ja-Nein-Fragen übertragen kann. Es gibt nämlich gerade 8 verschiedene Folgen von Rot- und Grün-Signalen, und jeder Antwort entspricht eine solche Folge. Zusammen überträgt man also 3 bit.

Stehen 8 verschiedene Zeichen zur Verfügung, so kann man die 3 bit auch mit einem einzigen Zeichen übertragen.

Man sieht, wie sich diese Regel verallgemeinern lässt: Verfügt die Quelle über 16 verschiedene Zeichen, so werden mit einem Zeichen 4 bit übertragen, beträgt die Zeichenzahl 32, so hat man 5 bit pro Zeichen usw.

> Beträgt die Zeichenzahl $2n$, so werden pro Zeichen n bit übertragen.

Wenn die Zeichenzahl gleich einer Potenz der Zahl zwei ist, können wir leicht angeben, wie viel bit pro Zeichen übertragen werden. Aber auch wenn die Zeichenzahl keine Zweierpotenz ist, kann die Bitzahl ausgerechnet werden – allerdings braucht man dazu ein mathematisches Werkzeug, das im Unterricht erst später behandelt wird. Immerhin können wir schon jetzt eine Abschätzung geben. Die Zeichenzahl betrage z. B. 25. Diese Zahl liegt zwischen den Zweierpotenzen $16 = 2^4$ und $32 = 2^5$. Daher werden in diesem Fall mit einem Zeichen zwischen 4 und 5 bit übertragen.

Aus Tab. 15.3 kann man die Bitzahl näherungsweise ablesen, wenn man die Zeichenzahl kennt. Eine solche Tabelle lässt sich leicht mit dem Taschenrechner herstellen.

Zeichenzahl	bit/Zeichen
2	1
4	2
8	3
16	4
32	5
64	6
128	7
256	8
512	9
1 024	10
2 048	11
4 096	12
8 192	13
16 384	14
32 768	15
65 536	16
131 072	17
262 144	18
524 288	19
1 048 576	20
2 097 152	21
4 194 304	22

Tab. 15.3

Aus einer bestimmten Zweierpotenz bekommt man die nächst höhere, indem man mit 2 multipliziert. So ist

$$2 \cdot 2^3 = 2^4 \text{ oder } 2 \cdot 8 = 16.$$

Genauso bekommt man die nächst niedrige, indem man durch 2 dividiert:

$$2^4 : 2 = 2^3 \text{ oder } 16 : 2 = 8.$$

Wir berechnen nun die nächst niedrige Zweierpotenz von 2^1:

$$2^1 : 2 = 2^0 \text{ oder } 2 : 2 = 1.$$

Man kann also eine Zahl auch zur nullten Potenz erheben. Jede beliebige Zahl hoch Null ergibt 1 (die einzige Ausnahme ist die Null selbst, der Ausdruck 0^0 ist nicht definiert). Insbesondere ist auch $2^0 = 1$. Wir können damit Tab. 15.3 vervollständigen. Beträgt die Zeichenzahl 1, so wird mit jedem Zeichen 0 bit übertragen. Ist das überraschend? Eigentlich nicht. Wenn Willy und Lilly verabreden, dass Willy heute Abend um 22 Uhr ein ganz bestimmtes Zeichen abschickt, so erfährt Lilly bestimmt nichts Neues, wenn das Zeichen bei ihr ankommt.

Wie sieht es aber im folgenden Fall aus: Willy verabredet mit Lilly, dass er um 22 h ein weißes Blinkzeichen sendet, falls der HSV ein bestimmtes Fußballspiel gewonnen hat. Hat der HSV nicht gewonnen, so sendet er kein Zeichen. Hier wird ganz eindeutig eine Nachricht übertragen, aber es wird scheinbar nur ein Zeichen benutzt. Tatsächlich gibt es aber auch hier zwei Zeichen. Die Taschenlampe kann nämlich um 22 h entweder ein- oder ausgeschaltet sein. Die Zeichen sind also „hell“ und „dunkel“.

Eine ähnliche Situation liegt vor bei der Schulklingel, der Hausklingel, der Autohupe, der Sirene, etc. In allen diesen Fällen gibt es zwei Zeichen, z. B. „Schulglocke klingelt“ und „Schulglocke klingelt nicht“.

Daten umladen und Daten umkodieren sind zwei ganz ähnliche Vorgänge, und die Unterscheidung zwischen ihnen ist etwas willkürlich. Wir betrachten noch einmal die beiden Codes von Willy und Lilly. Man kann ohne weiteres Nachrichten, die mit Willy’s Code, d. h. mit Licht vier verschiedener Farben, ankommen, in Lilly’s Code, d. h. in Lichtzeichen zwei verschiedener Farben umcodieren, und diesen Vorgang graphisch genauso wie einen Umladevorgang darstellen, Abb. 15.11.

Bei vielen modernen Anwendun.gen der Datentechnik werden Daten binär codiert: Computer und Internet arbeiten mit Binärzeichen, ebenso wie der Taschenrechner, das Smartphone und der MP3-Player.

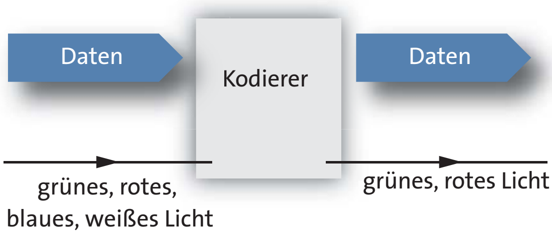


Abb. 15.11 Ein Umkodierer wird durch dasselbe Symbol dargestellt wie ein Datenumlader.

15.3 Beispiele für Datentransporte

Der Morse-Code

Abb. 15.12 zeigt, wie man Telegramme übertragen hat. Quelle und Empfänger sind hier Teile eines elektrischen Stromkreises. Sie sind durch zwei Leitungen miteinander verbunden.

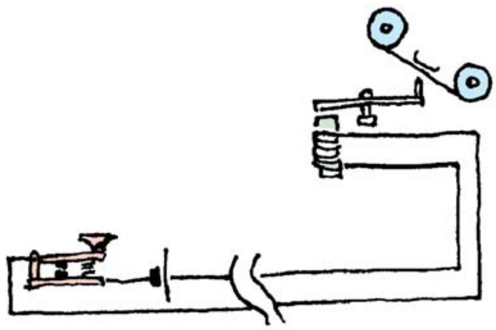


Abb. 15.12 Morseübertragung

Die Quelle ist eine Taste, durch die man den Stromkreis schließen kann. Wenn man den Stromkreis auf diese Weise schließt, drückt beim Empfänger ein Elektromagnet einen Schreibstift gegen ein vorbeilaufendes Papierband. Zur Datenübertragung wurde der Morse-Code verwendet, Tab. 15.4. Der Morse-Code benutzt vier Zeichen: „Punkt " (= kurzes Schließen des Stromkreises) , „Strich" (= längeres Schließen des Stromkreises), „kurze Pause" (innerhalb eines Buchstabens) und „längere Pause" (zwischen zwei Buchstaben). Da der Code vier Zeichen hat, werden pro Zeichen 2 bit übertragen. Der Morse-Code wird heute noch in der Schifffahrt und von Amateurfunkern verwendet.

a	·—
b	—···
c	—·—·
d	—··
e	·
f	··—·
g	——·
h	····
i	··
j	·———
k	—·—
l	·—··
m	——
n	—·
o	———
p	·——·
q	——·—
r	·—·
s	···
t	—
u	··—
v	···—
w	·——
x	—··—
y	—·——
z	——··
ä	·—·—
ö	———·
ü	··——
ch	————
.	·—·—·—
,	——··——
?	··——··
:	———···
1	·————
2	··———
3	···——
4	····—
5	·····
6	—
7	——···
8	———··
9	————·
0	—————

Tab. 15.4 Der Morse-Code

Die Schrift

Eins der wichtigsten Verfahren, Daten zu speichern und zu transportieren, ist die Schrift. Wie viel bit enthält ein Schriftzeichen? Wir müssen zunächst feststellen, wie viele verschiedene Schriftzeichen es gibt: Groß- und Kleinbuchstaben, Ziffern, Satzzeichen, Rechenzeichen und andere Sonderzeichen. Auch der Zwischenraum zwischen zwei Buchstaben stellt ein Zeichen dar. Wir nehmen an, dass nur diejenigen Zeichen verwendet werden dürfen, die man mit der Tastatur des Computers erzeugen kann. Die Tastatur hat etwa 50 Tasten. Jede Taste ist doppelt belegt, d. h. je nachdem, ob man die Umschalttaste drückt oder nicht, wird ein anderes Zeichen geschrieben. Bei den Buchstabentasten sind das jeweils der Klein- und der Großbuchstabe. Insgesamt kann die Schreibmaschine also etwa 100 Zeichen, d. h. zwischen 2^6 und 2^7 Zeichen schreiben. Jedes Zeichen trägt damit knapp 7 bit.

Bilder

Ein Computer erzeugt auf seinem Bildschirm ein Bild. Welche Datenmenge hat der Computer dazu zum Bildschirm geschickt? Bei einem typischen Computer besteht das Bild aus etwa $1600 \cdot 1200 = 1\,920\,000$ Bildpunkten, den sogenannten Pixeln. Wir nehmen als erstes an, es handle sich um einen Schwarz-Weiß-Bildschirm. Jeder Bildpunkt kann entweder schwarz oder weiß sein. Für jedes Pixel muss der Rechner 1 bit abschicken, für alle Punkte zusammen also rund 2 Mbit. Tatsächlich kann der Computer aber ein Farbbild erzeugen, wobei ein Bildpunkt beim Computer eine von 16 777 216 verschiedenen Farben annehmen kann. Da $16\,777\,216 = 2^{24}$ ist, muss der Rechner für jeden Bildpunkt 24 bit, für das ganze Bild also

$24 \cdot 2$ Mbit ≈ 50 Mbit abschicken.

Wenn ein Bild gespeichert wird, wird es gewöhnlich „komprimiert". Man nutzt dabei aus, dass die Pixel von ganzen Bereichen des Bildes gleich aussehen. So wird eine Bilddatei mit der jpeg-Kodierung auf ein Zehntel bis ein Hundertstel verkleinert.

Die Datenmenge eines Messwerts

Wenn jemand eine Messung macht, bekommt er Daten über den Gegenstand, an dem er die Messung durchführt.

Eine Balkenwaage sei bis zu 5 kg belastbar. Der Gewichtssatz enthalte als kleinstes Gewichtsstück ein 1-g-Gewicht. Auf die Frage „Wie schwer ist der Gegenstand?“ kann die Waage damit 5000 verschiedene Antworten geben. Die Zeichenzahl ist also 5000 und die Datenmenge, die mit der Antwort kommt, etwa 12 bit. Eine moderne Analysenwaage liefert bis zu 20 bit pro Wägung.

Um die Datenmenge zu berechnen, die man beim Ablesen einer Analog-Skala, wie z. B. der Skala eines Thermometers, bekommt, muss man sich als Erstes darüber klar werden, welche benachbarten Werte auf der Skala noch unterschieden werden können. Beim Thermometer beträgt die Ablesegenauigkeit etwa 1 °C. Wenn der Messbereich von –30 °C bis +90 °C geht, ergibt sich eine Zeichenzahl von 120. Wenn man die Temperatur abliest, bekommt man also etwa 7 bit.

Aufgaben

1. Im Bereich der Deutschen Post können 100 000 verschiedene Postleitzahlen benutzt werden. Wie groß ist die Datenmenge, die von einer Postleitzahl getragen wird?
2. Wie groß die Datenmenge einer Telefonnummer ist, hängt davon ab, ob man die Nummer aus einem Ortsnetz, aus dem nationalen Netz oder dem internationalen Netz auswählt. Schätze die Datenmenge einer Telefonnummer aus einem Ortsnetz mit 10 000 Anschlüssen ab.
3. Die chinesische Schrift kennt sehr viele verschiedene Zeichen. Normalerweise benutzt man etwa 2000. Wie viel bit trägt ein Schriftzeichen, wenn man von dieser Zahl ausgeht?
4. Eine Quelle sendet mit jedem Zeichen 5 bit aus. Über wie viel verschiedene Zeichen verfügt die Quelle?
5. Eine Quelle hat die Zeichenzahl 3. Zeichne für diese Quelle einen Entscheidungsbaum. (Er soll drei aufeinander folgende Entscheidungen umfassen.) Gib eine Abschätzung für die Datenmenge an, die ein Empfänger mit drei aufeinander folgenden Zeichen von dieser Quelle erhält.
6. Quelle A hat eine Zeichenzahl, die mit einer Zweierpotenz übereinstimmt. Quelle B hat eine doppelt so große Zeichenzahl. Was folgt hieraus für die Datenmengen, die beide Quellen pro Zeichen aussenden?
7. Ein Zaubertrick mit Karten: Man benutzt 16 verschiedene Karten eines beliebigen Kartenspiels. Der Zauberer lässt einen Zuschauer eine Karte ziehen. Der Zuschauer betrachtet die Karte so, dass sie der Zauberer nicht sehen kann. Die Karte wird wieder in das Kartenspiel gesteckt, und die Karten werden gemischt. Der Zauberer deckt nun die Karten, eine nach der anderen, auf. Dabei legt er sie auf vier verschiedene Stapel: eine Karte auf den ersten, die nächste auf den zweiten, eine auf den dritten, eine auf den vierten, dann wieder eine auf den ersten usw., bis alle 16 Karten auf dem Tisch liegen. Der Zuschauer muss nun sagen, auf welchem der vier Stapel seine Karte liegt. Der Zauberer macht dann aus den vier Stapeln wieder ein Paket und breitet die Karten noch einmal in vier Stapeln aus, und noch einmal sagt der Zuschauer, auf welchem Stapel seine Karte liegt. Der Zauberer kennt jetzt die Karte, die sich der Zuschauer gemerkt hat: Er packt die vier Stapel wieder zusammen und blättert dann eine Karte nach der anderen auf, bis er zu der Karte kommt, die sich der Zuschauer gemerkt hatte.
   Welche Datenmenge muss der Zauberer bekommen, um eine von 16 Karten zu identifizieren? Wie viel bit bekommt er jedes Mal, wenn der Zuschauer den Stapel bezeichnet, in dem sich die Karte befindet? Wie funktioniert der Trick?

15.4 Die Datenstromstärke

Immer wenn etwas strömt — es kann sich dabei um Wasser, Autos, Menschen, Energie, Elektrizität oder irgendwelche anderen Dinge, Stoffe oder physikalischen Größen handeln —, kann man nach der Stromstärke fragen. Wie wir wissen, erhält man die Stärke eines Stroms, indem man die Menge, die in einer bestimmten Zeit an irgend einer Stelle des Stroms vorbeifließt, durch die Zeit teilt, die diese Menge zum Vorbeifließen braucht.

Unter der Datenstromstärke an irgendeiner Stelle eines Übertragungsweges versteht man entsprechend den Quotienten aus der Datenmenge, die dort in einer bestimmten Zeit vorbeifließt, und der Zeit, die für das Vorbeifließen benötigt wurde:

$$\text{Datenstromstärke} = \frac{\text{Datenmenge}}{\text{Zeit}}$$

oder in Symbolen

$$I_H = \frac{H}{t}$$

Als Maßeinheit für die Datenstromstärke I_H ergibt sich bit/s. Je mehr bit in einer Sekunde übertragen werden, desto größer ist die Datenstromstärke.

Die Datenstromstärke ist eine nützliche Größe. Sie gestattet es, die Leistungsfähigkeit von Datenübertragungsvorrichtungen miteinander zu vergleichen. Wir betrachten einige Beispiele von Datenströmen.

Telefon und Radio

Wenn man telefoniert, fließt ein Datenstrom von etwa 50 kbit/s. Die Qualität der Übertragung von akustischen Daten per Telefon ist nicht sehr hoch. Für eine bessere Übertragung wird eine größere Datenstromstärke gebraucht. Daher ist die Datenstromstärke bei einer CD viel größer als beim Telefon. Sie beträgt etwa 1000 kbit/s. Auch die Datenmenge akustischer Daten kann vermindert werden, durch geschickte Kodierung und durch Weglassen von Information, die man gar nicht wahrnehmen würde. So wird die Datenmenge durch die MP3-Kodierung auf etwa ein Zehntel vermindert.

Fernsehen

Wir hatten früher (in Abschnitt 15.3) die Datenmenge eines einzigen, stehenden Fernsehbildes berechnet. Es ergab sich H = 50 Mbit. Nun werden bei einer Fernsehsendung 25 Bilder pro Sekunde übertragen. Dadurch entsteht der Eindruck einer stetigen Bewegung der Objekte auf dem Bildschirm. Aus diesen Werten ergibt sich die Stärke des Datenstroms, der vom Fernsehsender zum Fernsehempfänger fließt:

$$\begin{aligned} &50\ \text{Mbit/Bild} \cdot 25\ \text{Bilder/Sekunde} \\ &= 1250\ \text{Mbit/Sekunde} \\ &\approx 1000\ \text{Mbit/Sekunde.} \end{aligned}$$

Wieder gilt, dass dieser Datenstrom durch geeignetes Kodieren vermindert werden kann. In jedem Fall gilt aber die Regel:

> Bei der optischen Wahrnehmung fließt ein Datenstrom, der etwa 1000 mal so groß ist wie bei der akustischen Wahrnehmung.

Das Internet

Wenn man Daten aus dem Internet holt, wird die mittlere Datenstromstärke auf dem Bildschirm angezeigt. Sie hängt davon ab, wie stark das Netz gerade belastet ist und wo sich der Server befindet, von dem man die Daten holt. Sie kann bekanntlich sehr unterschiedlich sein.

Aufgaben

1. Ein mit der Computertastatur getipptes Zeichen trägt etwa 7 bit. Welche Stärke hat der Datenstrom, der von der Tastatur zum Rechner fließt, wenn mit 180 Anschlägen pro Minute getippt wird?
2. Du bist dabei, Daten aus dem Internet herunterzuladen. Die Datenstromstärke beträgt 25 kbit/s. Wie lange dauert der Empfang eines Buches? (Rechne mit 250 Seiten, 40 Zeilen pro Seite, 70 Zeichen pro Zeile und 7 bit pro Zeichen.)

16 ELEKTRIZITÄT UND ELEKTRISCHE STRÖME

Wie die Mechanik vom Impuls und dessen Übertragung handelt und die Wärmelehre von der Wärme und Wärmeübergängen, so beschäftigt sich die Elektrizitätslehre mit der Elektrizität und den Strömen der Elektrizität.

Was versteht man unter Elektrizität? Auf diese Frage können wir zunächst nur eine sehr grobe, provisorische Antwort geben. Was Elektrizität ist, wirst du aber umso besser verstehen, je weiter du dich in diesem und in den folgenden Kapiteln vorgearbeitet hast. Im Augenblick kann man die Frage etwa so beantworten: Elektrizität ist das, was in den Drähten des Kabels eines elektrischen Geräts „fließt" — falls das Gerät eingeschaltet ist. Man kann sich Elektrizität vorstellen als eine Art Zeug, das sich irgendwo befindet, und das von einer Stelle zu einer anderen gelangen kann — ähnlich wie wir uns Impuls und Entropie als eine Art Zeug vorstellen können.

Wir sehen es einem Körper meist an, ob er Impuls hat oder nicht: Wir sehen es daran, ob er sich bewegt oder nicht. Wir „sehen" es einem Körper auch an, ob er viel oder wenig Entropie enthält: Wir merken es an seiner Temperatur. Wir haben dagegen kein Sinnesorgan für den Elektrizitätsinhalt eines Gegenstandes. Man spürt zwar die Elektrizität, wenn man einen elektrischen Schlag bekommt, aber das wollen wir natürlich vermeiden, denn es ist gefährlich.

Du weißt, dass die Elektrizität in der Technik eine wichtige Rolle spielt. Du wirst in den folgenden Kapiteln die Funktionsweise einiger technischer Geräte kennen lernen. Man kann die technischen Anwendungen der Elektrizität in zwei große Bereiche einteilen.

Die eine Klasse von Anwendungen hat damit zu tun, dass man mithilfe der Elektrizität Energie übertragen und speichern kann. Die Elektrizität ist nämlich ein sehr praktischer Energieträger. Viele elektrische Geräte dienen daher dazu, Energie von Elektrizität auf einen anderen Energieträger oder von einem anderen Energieträger auf Elektrizität umzuladen. Zu diesen Geräten gehören z. B. Elektromotor, Generator und alle elektrischen Heizgeräte.

Bei der zweiten Klasse von technischen Anwendungen wird die Elektrizität zur Übertragung, zur Speicherung und Verarbeitung von Daten benutzt: von Musik, geschriebenen und gesprochenen Texten, von Bildern, Zahlen und anderen Zeichen. Man nennt diesen Bereich der Technik Elektronik.

In der Natur scheint die Elektrizität bei oberflächlicher Betrachtung keine große Bedeutung zu haben. Die einzige elektrische Erscheinung, die jeder kennt, ist das Gewitter. Aber der Schein trügt. Tatsächlich wird die Struktur der Mikrowelt, der Welt der Atome und Moleküle, zum großen Teil durch die Elektrizität bestimmt. Die Atome verdanken der Elektrizität ihren inneren Aufbau, und der Zusammenhalt der Atome untereinander wird erst durch die Elektrizität ermöglicht. Mit diesen Fragen beschäftigt sich die Atomphysik.

16.1 Der elektrische Stromkreis

Abb. 16.1 zeigt eine Glühlampe, die über einen Schalter an eine Batterie angeschlossen ist. Denselben Aufbau hat eine Taschenlampe. Von der Batterie gelangt die Energie mit dem Träger Elektrizität zur Lampe. Sie wird dort auf den Energieträger Licht umgeladen. Die Energie kommt aus der Batterie, sie gelangt zur Lampe und verlässt die Lampe mit dem Licht. Die Batterie wird dabei langsam leer, d. h. ihr Energieinhalt nimmt ab.

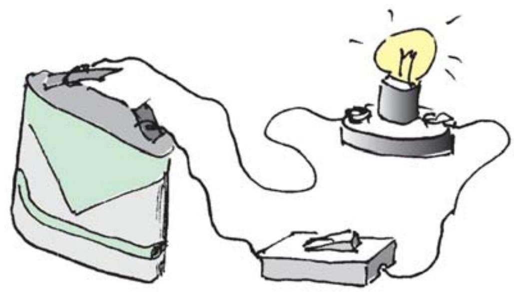


Abb. 16.1 Einfacher Stromkreis

Der Träger der Energie, die Elektrizität, nimmt einen anderen Weg: Die Elektrizität fließt „im Kreis herum". Sie kommt an einem der beiden Anschlüsse, am Plusanschluss, aus der Batterie heraus, fließt durch den einen Draht zur Lampe, dann durch den Glühfaden hindurch, weiter durch den zweiten Draht über den Schalter zum Minusanschluss der Batterie, und durch die Batterie hindurch wieder zum Plusanschluss. Weil sich die Elektrizität hier auf einem geschlossenen Weg bewegt, ohne sich irgendwo anzuhäufen, nennt man die ganze Anordnung einen elektrischen Stromkreis. Den Strom der Elektrizität nennt man auch kurz den elektrischen Strom.

Die Elektrizität kann nicht in jedem beliebigen Material fließen. Stoffe, in denen sie gut fließt, nennt man elektrische Leiter. Stoffe, in denen sie nicht fließen kann, nennt man elektrische Nichtleiter. Zu den Leitern gehören alle Metalle. Nichtleiter sind Luft, Glas und die meisten Kunststoffe.

Die Elektrizität ist eine physikalische Größe. Das Symbol für diese Größe ist Q. Sie wird gemessen in Coulomb, abgekürzt C.

Ein elektrischer Stromkreis hat eine Ähnlichkeit mit einem Hydraulikstromkreis, wie er zum Beispiel beim Bagger verwendet wird, Abb. 16.2.

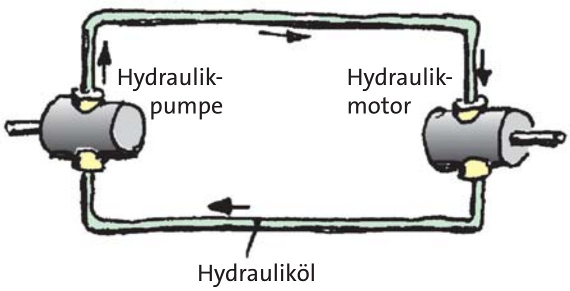


Abb. 16.2 Der Hydraulikstromkreis hat große Ähnlichkeit mit einem elektrischen Stromkreis.

Auch hier fließt der Energieträger, nämlich das Hydrauliköl, in einem geschlossenen Stromkreis.

Die Flussbilder, Abb. 16.3 und Abb. 16.4, lassen die Ähnlichkeit erkennen.

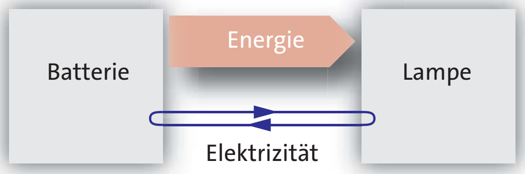


Abb. 16.3 Flussbild des elektrischen Stromkreises von Abb. 16.1

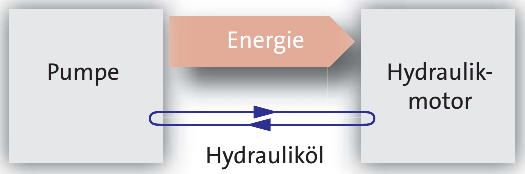


Abb. 16.4 Flussbild des Hydraulikstromkreises von Abb. 16.2

So wie beim Hydraulikstromkreis die Pumpe dafür sorgt, dass die Flüssigkeit strömt, so ist in unserem elektrischen Stromkreis die Batterie die Ursache für das Fließen der Elektrizität. Wir können uns die Batterie daher als eine Elektrizitätspumpe vorstellen.

Es gibt noch andere Quellen, die Energie mit dem Träger Elektrizität abgeben, d. h. andere Elektrizitätspumpen. Eine ist der Fahrraddynamo. Im Prinzip dasselbe Gerät befindet sich unter dem Namen Lichtmaschine in jedem Auto. Sehr große Dynamos, wie sie in Elektrizitätswerken stehen, nennt man Generatoren. Einen weiteren Typ von Elektrizitätspumpen stellen die Solarzellen dar. Während der Dynamo seine Energie mit dem Drehimpuls bekommt, empfängt die Solarzelle ihre Energie mit dem Licht.

> Batterie, Dynamo und Solarzelle sind Elektrizitätspumpen.

Der Stromkreis von Abb. 16.1 sei zunächst unterbrochen. Wir schließen den Schalter, es fließt Elektrizität durch die Lampe. Woher kommt diese Elektrizität? Aus der Batterie, könnte man denken, genauso wie die Energie. Tatsächlich ist es anders. Wie eine Wasserpumpe an ihrem Ausgang nur so viel Wasser abgeben kann, wie sie am Eingang aufnimmt, so kann eine Elektrizitätspumpe an ihrem Ausgang, d. h. am Plusanschluss, nur so viel Elektrizität abgeben, wie sie am Minusanschluss aufnimmt. Woher kommt also die Elektrizität?

Sie ist von vornherein in den Bauteilen des Stromkreises enthalten: in der Batterie, in der Lampe und in den Drähten. Diese Elektrizität wird aber nicht etwa vom Hersteller in diese Geräte hineingebracht, sie ist schon von Natur aus darin. Jedes Stück Draht, ja jedes Stück Metall enthält Elektrizität, die zu fließen beginnt, sobald man den Draht oder das Metallstück in einen Stromkreis einbaut.

Baut man einen elektrischen Stromkreis auf, so braucht man sich also nicht um das Füllen mit Elektrizität zu kümmern. Es ist so, als ob man Hydraulikstromkreise aufbaute aus Pumpen, Schläuchen und Motoren, die bereits mit Hydrauliköl gefüllt sind. Solche Stromkreise könnten sofort arbeiten, sie brauchten nicht erst noch mit Öl gefüllt zu werden.

Wir haben es im Folgenden viel mit elektrischen Stromkreisen zu tun, auch mit komplizierteren. Es lohnt sich daher, für ihre Darstellung Symbole einzuführen. Abb. 16.5 zeigt die Symbole einer Batterie, eines geöffneten Schalters, einer Glühlampe und eines Elektromotors. Ein Draht,

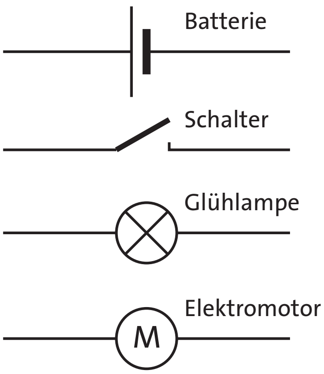


Abb. 16.5 Symbole einiger elektrischer Bauelemente: Batterie, geöffneter Schalter, Glühlampe und Elektromotor

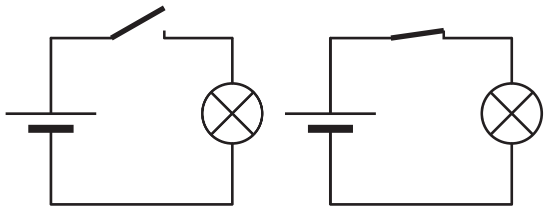


Abb. 16.6 Symbolische Darstellung des Stromkreises von Abbildung 16.1 mit zwei verschiedenen Schalterstellungen

d. h. eine Elektrizitätsleitung, wird einfach durch einen geraden Strich dargestellt.
In Abb. 16.6 ist der Stromkreis von Abb. 16.1 mithilfe dieser Symbole dargestellt, und zwar einmal mit geöffnetem und einmal mit geschlossenem Schalter. Wir nennen einen Aufbau aus Drähten, Schaltern, Batterien, Lampen etc. oft eine Schaltung.

16.2 Die elektrische Stromstärke

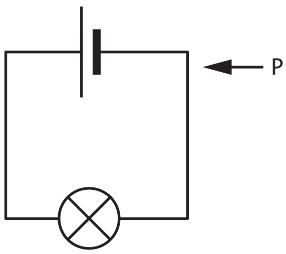


Abb. 16.7 An der Stelle P des Stromkreises fließt pro Sekunde eine bestimmte Menge Elektrizität vorbei.

Wir betrachten eine bestimmte Stelle P eines elektrischen Stromkreises, Abb. 16.7.
An dieser Stelle kann pro Sekunde viel oder wenig Elektrizität vorbeifließen, je nachdem, was für eine Batterie und was für eine Lampe wir verwenden. Man sagt, die Stärke des elektrischen Stroms kann größer oder kleiner sein. Ähnlich wie bei anderen Stromstärken (z. B. Energiestromstärke, Wasserstromstärke) legt man fest:

$$\text{elektrische Stromstärke} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Zeit}}$$

Die elektrische Stromstärke kürzt man durch den Buchstaben I ab.

Es ist also

$$I = \frac{Q}{t}$$

Als Maßeinheit für die elektrische Stromstärke ergibt sich

Coulomb/Sekunde = C/s.

Für diese zusammengesetzte Maßeinheit benutzt man meist einen eigenen Namen: Ampere, abgekürzt A. Es ist also A = C/s.

Name der Größe	Elektrizitätsmenge	elektrische Stromstärke
Abkürzung	Q	I
Name der Maßeinheit	Coulomb	Ampere
Abkürzung	C	A

Tab. 16.1

In Tab. 16.1 sind die Namen der neuen Größen zusammen mit ihren Maßeinheiten und den jeweiligen Abkürzungen noch einmal zusammengefasst.

Um uns eine Vorstellung davon zu machen, welche Ströme schwach sind und welche stark, wollen wir einige Messungen machen. Das Gerät, mit dem man elektrische Stromstärken misst, heißt Amperemeter. Ein Amperemeter hat zwei Anschlüsse, Abb. 16.8.

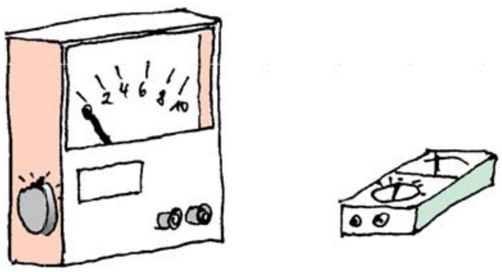


Abb. 16.8 Zwei Amperemeter

Um die Stärke des Stroms in dem Draht von Abb. 16.9a zu messen, trennt man den Draht durch, Abb. 16.9b. Dabei entstehen zwei neue Enden. Diese Enden verbindet man mit den Anschlüssen des Amperemeters, Abb. 16.9c. Die Elektrizität muss jetzt durch das Amperemeter hindurchfließen.

a)
b)
c)

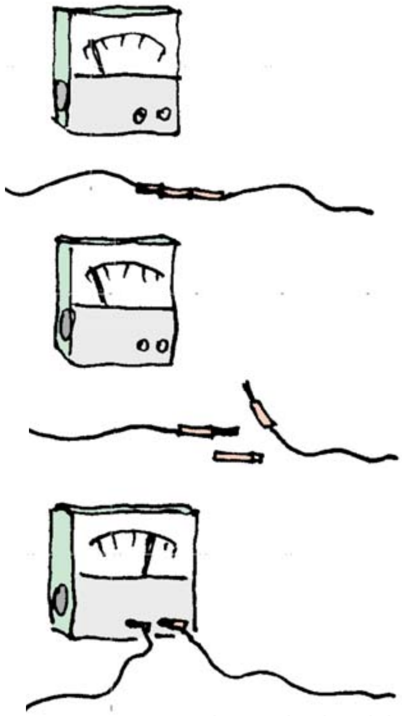


Abb. 16.9 Zur Messung der Stärke des elektrischen Stroms in einem Draht

> Um die Stärke des elektrischen Stroms in einer Leitung zu messen, trennt man die Leitung durch und verbindet die beiden neu entstandenen Enden mit den Anschlüssen des Amperemeters.

Abb. 16.10 zeigt einen Stromkreis, in den ein Amperemeter eingebaut ist (Symbol des Amperemeters: ein Kreis mit dem Buchstaben A). Das Amperemeter zeigt 0,5 A an, einen für ein kleines Lämpchen typischen Wert.

Setzt man das Amperemeter an eine andere Stelle des Stromkreises, Abb. 16.11, so zeigt es natürlich dasselbe an. An jeder Stelle des Stromkrei-

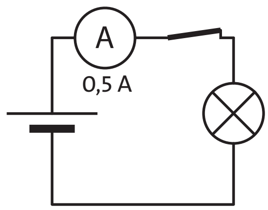


Abb. 16.10 Stromkreis von Abb. 16.1, in den ein Amperemeter eingebaut wurde

ses muss ja pro Sekunde dieselbe Elektrizitätsmenge fließen, oder genauer: durch jeden Querschnitt, den man durch den Draht legen kann.

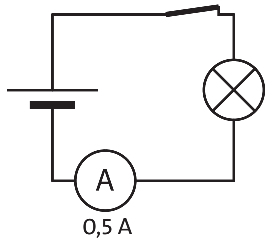


Abb. 16.11 Das Amperemeter zeigt immer denselben Wert an, egal an welcher Stelle des Stromkreises es sich befindet.

Wir können auch mehrere Amperemeter in den Stromkreis einbauen, ohne dass sich an der Stromstärke etwas ändern würde, Abb. 16.12. Jedes Amperemeter zeigt jetzt die Stromstärke 0,5 A an. Die Situation ist ähnlich, wie wenn man die Zeit, die jemand für einen Hundertmeterlauf braucht, mit drei Stoppuhren gleichzeitig misst.

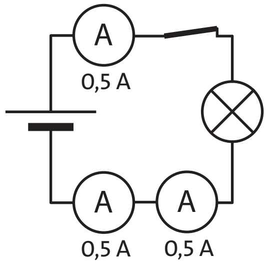


Abb. 16.12 Mehrere Amperemeter „hintereinander geschaltet" zeigen dasselbe an wie ein einziges.

In Tab. 16.2 sind einige typische Stromstärkewerte aufgeführt.

Stärke des Stromes	
durch eine 18-W-Lampe	0,078 A
in den Leitungen eines Taschenrechners	0,01 mA
durch den Motor einer Elektrolokomotive	500 A
in einem Blitz	einige 1000 A
durch einen Spielzeugmotor	1 A

Tab. 16.2

16.3 Die Knotenregel

Eine Stelle, an der sich mehrere Ströme treffen, nennen wir einen Knoten, egal um was für Ströme es sich handelt: Energieströme, Wasserströme oder auch elektrische Ströme.

Abb. 16.13 zeigt eine Anordnung aus elektrischen Bauteilen, die nicht mehr einen einfachen Stromkreis darstellt. Man nennt eine solche Anordnung einen verzweigten Stromkreis.

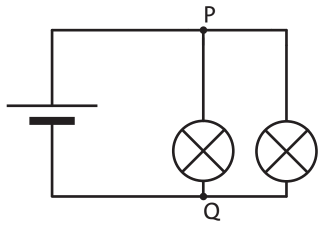


Abb. 16.13 Der verzweigte Stromkreis enthält die beiden Knoten P und Q.

Die Schaltung von Abb. 16.13 enthält zwei Knoten P und Q. Die Elektrizität kommt vom Plusanschluss der Batterie. Im Knoten P verzweigt sich der Elektrizitätsstrom. Ein Teil der Elektrizität fließt durch die linke Lampe, der Rest durch die rechte. Im Knoten Q fließen die beiden Ströme wieder zusammen. Von Q aus fließt dann die gesamte Elektrizität weiter zum Minusanschluss der Batterie und durch die Batterie zurück zum Plusanschluss.

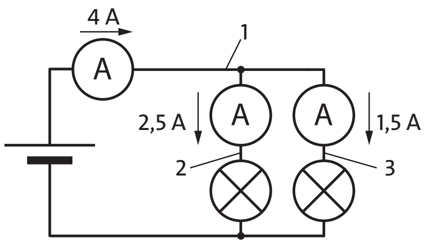


Abb. 16.14 In die Schaltung von Abbildung 16.13 wurden drei Amperemeter eingebaut.

Abb. 16.14 zeigt dieselbe Anordnung wie Abb. 16.13, nur wurden hier noch drei Amperemeter eingebaut. Das Amperemeter, das die Stärke I_1 des Stroms in Leitung 1 misst, also vor der Verzweigung P, zeigt 4 Ampere an. Zum Knoten P hin fließen also pro Sekunde 4 Coulomb. Das Amperemeter in Leitung 2 zeigt 2,5 A an. Durch diese Leitung fließen also pro Sekunde 2,5 C vom Knoten P weg. Wie viel zeigt das dritte Amperemeter an? Damit die Bilanz stimmt, müssen von P durch Leitung 3 pro Sekunde 1,5 C wegfließen. Die Stärke des Stroms in Leitung 3 ist also 1,5 A.

Die Situation ist dieselbe wie beim Zusammenfluss von zwei Flüssen, Abb. 16.15. Auch hier muss vom „Knoten“ genauso viel wegfließen wie zum „Knoten“ hin.

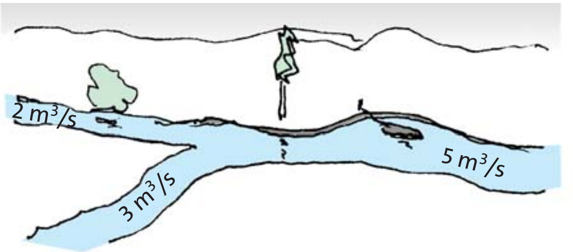


Abb. 16.15 Auch für den Zusammenfluss von Flüssen gilt die Knotenregel.

Abb. 16.16 zeigt einen Ausschnitt aus einer komplizierteren elektrischen Schaltung. Hier treffen sich 6 Leitungen in einem Knoten. Überprüfe, ob die Bilanz stimmt.

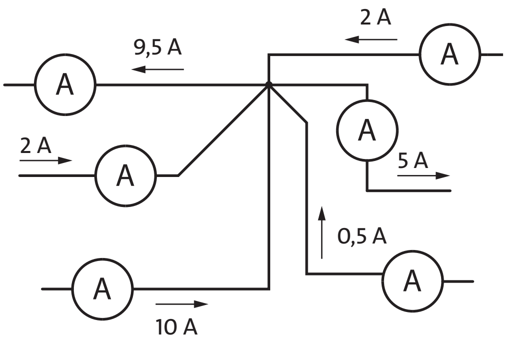


Abb. 16.16 Ausschnitt aus einer komplizierteren Schaltung. Hier treffen sich sechs Leitungen in einem Knoten.

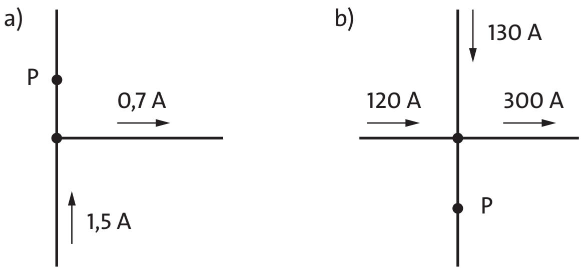


Abb. 16.17 Zu den Aufgaben 1 und 2

Wir haben hier immer unsere altbekannte Knotenregel angewendet:

> Die zu einem Knoten hinfließenden Ströme sind zusammen genauso stark wie die wegfließenden.

Aufgaben

1. Wie stark ist der elektrische Strom, der an der Stelle P in Abb. 16.17a fließt? In welche Richtung fließt er?
2. Wie stark ist der elektrische Strom, der an der Stelle P in Abb. 16.17b fließt? In welche Richtung fließt er?
3. Was lässt sich über die Stromstärken an den Stellen P und Q in Abb. 16.18a sagen?
4. (a) Baue in die Schaltung von Abb. 16.18b zwei Schalter ein, sodass sich die Lampen unabhängig voneinander ein- und ausschalten lassen. (b) Baue einen einzigen Schalter ein, durch den sich beide Lampen gemeinsam ein- und ausschalten lassen.
5. Was zeigen die Amperemeter 2, 3 und 4 in Abb. 16.19a an?
6. Wie stark ist der elektrische Strom an der Stelle P in Abb. 16.19b? Baue in den Stromkreis ein Amperemeter ein, das die Stärke des Stroms durch den Motor misst, und eins, das die Stärke des Stroms durch die Lampe misst.

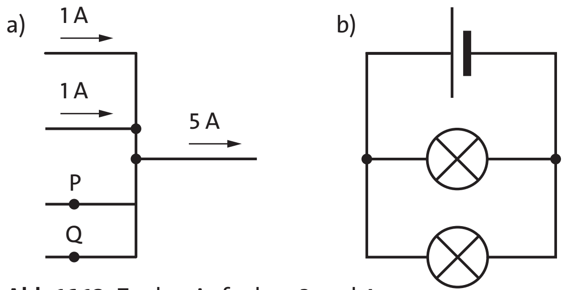


Abb. 16.18 Zu den Aufgaben 3 und 4

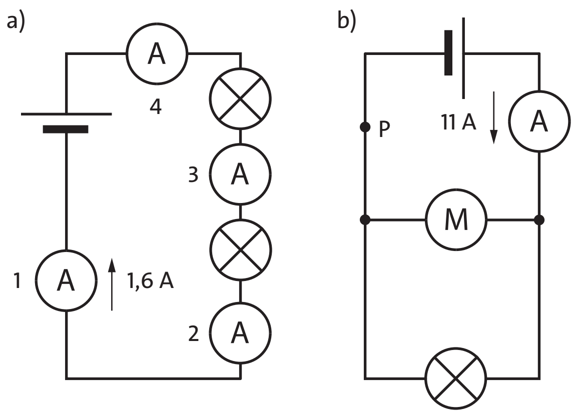


Abb. 16.19 Zu den Aufgaben 5 und 6

16.4 Das elektrische Potenzial

Eine Wasserpumpe sorgt dafür, dass das Wasser an ihrem Ausgang einen höheren Druck hat als am Eingang, Abb. 16.20. Sie erzeugt einen Druckunterschied. Dieser Druckunterschied kann einen Wasserstrom verursachen.

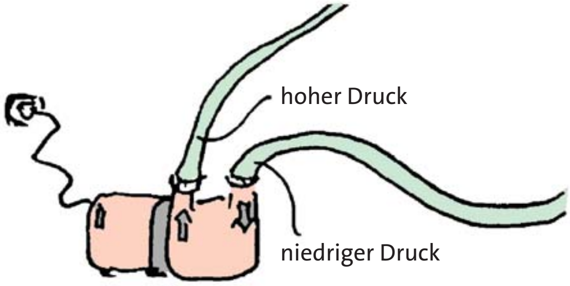


Abb. 16.20 Der Druck ist am Ausgang der Wasserpumpe höher als am Eingang.

Auch eine Batterie, d. h. eine Elektrizitätspumpe, erzeugt einen Antrieb: einen Antrieb für einen elektrischen Strom. Und auch hier gibt es eine Größe, die an dem einen Pol, dem Plusanschluss, einen höheren Wert hat als am anderen, dem Minusanschluss, Abb. 16.21. Diese Größe heißt elektrisches Potenzial. Das elektrische Potenzial in einem elektrischen Stromkreis entspricht dem Druck in einem Hydraulikstromkreis.

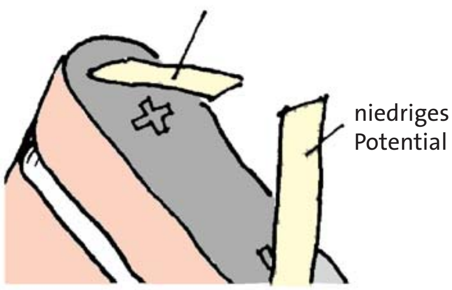


Abb. 16.21 Das elektrische Potenzial ist am Plusanschluss der Batterie (Ausgang) höher als am Minusanschluss (Eingang).

Eine Batterie erzeugt einen Potenzialunterschied, und dieser stellt den Antrieb für einen Elektrizitätsstrom dar.

> Eine Elektrizitätspumpe (Batterie, Dynamo) erzeugt einen Potenzialunterschied. Der Potenzialunterschied ist ein Antrieb für einen elektrischen Strom.
>
> Am Plusanschluss ist das Potenzial höher als am Minusanschluss.

Abb. 16.22 zeigt einige Elektrizitätspumpen: drei verschiedene Typen von Batterien. Der Potenzialunterschied ist jeweils aufgedruckt.

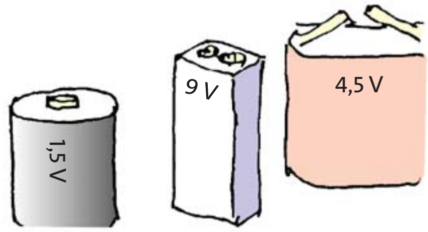


Abb. 16.22 Drei „Elektrizitätspumpen", bei denen der Wert der Potenzialdifferenz aufgedruckt ist

Die Maßeinheit des elektrischen Potenzials ist das Volt, abgekürzt V. So erzeugt eine Monozelle einen Potenzialunterschied von 1,5 V, eine Flachbatterie macht eine Potenzialdifferenz von 4,5 V und eine Autobatterie 12 V.

Statt Potenzialunterschied oder Potenzialdifferenz sagt man auch elektrische Spannung, oder kurz Spannung. Zwischen den Anschlüssen einer Flachbatterie besteht also eine Spannung von 4,5 V.

> Elektrische Potenzialdifferenz = elektrische Spannung

Als Symbol für das Potenzial benutzt man den griechischen Buchstaben φ (sprich: fi), als Symbol der Spannung U. Für unsere Flachbatterie haben wir damit

$$\varphi^{+} - \varphi^{-} = 4{,}5\ \mathrm{V}$$

oder

$$U = 4{,}5\ \mathrm{V}.$$

In Tab. 16.3 sind Namen, Maßeinheit und Abkürzungen noch einmal zusammengefasst.

Name der Größe	Elektrisches Potenzial	elektrische Spannung
Abkürzung	φ	U
Name der Maßeinheit	Volt	Volt
Abkürzung	V	V

Tab. 16.3

Um den Wert der Potenzialdifferenz einer Batterie zu erfahren, braucht man sich nicht auf den Aufdruck zu verlassen, denn Spannungen lassen sich leicht messen. Man braucht dazu ein Voltmeter. Ein Voltmeter hat zwei Anschlüsse (wie das Amperemeter). Um die Spannung zwischen zwei Punkten eines Stromkreises zu messen, verbindet man die beiden Punkte mit den Anschlüssen des Voltmeters, Abb. 16.23 und Abb. 16.24.

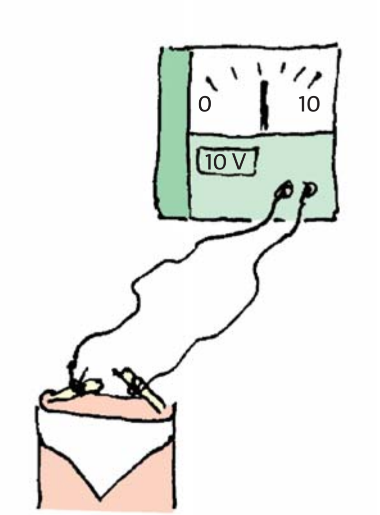


Abb. 16.23 Um eine elektrische Spannung zwischen zwei Punkten zu messen, verbindet man die beiden Punkte mit den Anschlüssen des Voltmeters.

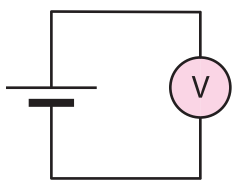


Abb. 16.24 Dieselbe Anordnung wie in Abb. 16.23, aber mithilfe von Symbolen dargestelltges.

Stellen, die durch ein Kabel miteinander verbunden sind, befinden sich auf demselben Potenzial. Die vier Voltmeter in Abb. 16.25 zeigen daher alle dieselbe Spannung an.

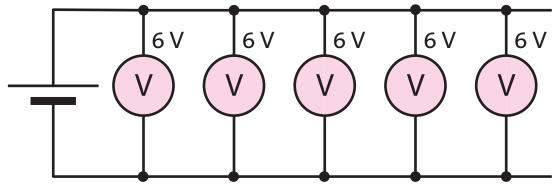


Abb. 16.25 Mehrere „parallel geschaltete" Voltmeter zeigen dieselbe Spannung an wie ein einziges.

Voltmeter sind so gebaut, dass nur ein sehr kleiner elektrischer Strom durch sie hindurchfließt. Ein Amperemeter, das man in eine Zuleitung zu einem Voltmeter einbaut, zeigt daher, wenn es nicht sehr empfindlich ist, 0 A an, Abb. 16.26.

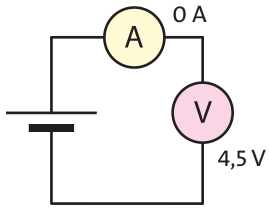


Abb. 16.26 Durch das Voltmeter fließt (fast) kein elektrischer Strom. Das Amperemeter zeigt daher 0 A an.

Wenn eine Batterie leer ist (d. h. wenn alle Energie heraus ist), erzeugt die Batterie keinen Potenzialunterschied mehr. Man kann daher mit einem Voltmeter feststellen, ob eine Batterie noch brauchbar ist.

Ein Netzgerät ist eine elektrische Energiequelle, die man an die Steckdose anschließen muss. Das Netzgerät bekommt also seine Energie mit dem Träger Elektrizität und gibt sie mit der Elektrizität wieder ab. Trotzdem gibt es einen Unterschied zwischen Ein- und Ausgang: Die elektrische Spannung am Ausgang des Netzgeräts ist nicht dieselbe wie am Eingang. Oft ist die Spannung am Ausgang eines Netzgeräts regelbar. Außerdem liegt zwischen den Anschlüssen der Steckdose eine sogenannte Wechselspannung (eine Spannung, deren Wert sich im Verlauf der Zeit sehr schnell ändert), während die meisten Netzgeräte an ihrem Ausgang eine Gleichspannung, d. h., eine zeitlich konstante Spannung liefern.

16.5 Der Potenzialnullpunkt

Vor dir auf dem Tisch steht eine volle Flachbatterie. Der Potenzialunterschied zwischen ihren Anschlüssen ist 4,5 V, das Potenzial am Plusanschluss ist also um 4,5 V höher als am Minusanschluss. Wie groß ist aber das Potenzial des Minusanschlusses selbst? Und wie groß ist das Potenzial des Plusanschlusses?

Diese Fragen sind nicht leicht zu beantworten. Die Lösung des Problems wird uns aber leichter fallen, wenn wir zunächst eine andere Frage klären. Abb. 16.27 zeigt einen Meterstab, der senkrecht auf einem Tisch steht, und wir stellen die Frage: In welcher Höhe befindet sich das obere Ende des Meterstabes?

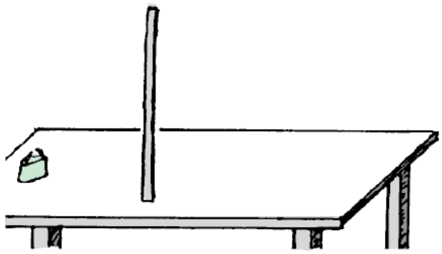


Abb. 16.27 Auf welchem Potenzial befindet sich der Plusanschluss der Batterie? In welcher Höhe befindet sich das obere Ende des Meterstabes?

Alles, was wir im Augenblick sagen können ist, dass sich das obere Ende 1 m über dem unteren befindet. Aber in welcher Höhe befindet sich das untere Ende? Die Antwort auf diese Frage hängt davon ab, worauf wir uns beziehen: auf den Fußboden des Zimmers, auf das Niveau der Erde außerhalb des Hauses oder auf noch irgendein anderes Niveau. Du weißt sicher, dass es üblich ist, Höhenangaben eines Geländes auf die Meeresoberfläche zu beziehen. Man setzt die Höhe der Meeresoberfläche willkürlich gleich 0 m. Wir könnten nun im Prinzip die Höhe des oberen Endes des Stabes in Bezug auf die Meeresoberfläche angeben. Tatsächlich ist aber der Abstand zum Meeresniveau im Allgemeinen nicht leicht festzustellen.

Mit dem Potenzial verhält es sich ganz ähnlich wie mit der Höhe. Wir müssen als Erstes festlegen, welchem elektrischen Leiter wir den Potenzialwert 0 V zuordnen. Von diesem ausgehend kann man dann die Potenzialwerte aller anderen Drähte, elektrischen Anschlüsse usw. angeben. Der Leiter, dessen Potenzial wir zum Bezugspotenzial erklären, soll natürlich jedem zugänglich sein. Ein Leiter, der diese Bedingung erfüllt, ist die Erde. Man hat daher festgelegt:

> Das Potenzial der Erde beträgt 0 V.

Verbindet man irgendeinen Punkt eines elektrischen Stromkreises über einen Draht mit der Erde, so ist sichergestellt, dass sich dieser Punkt auf 0 Volt befindet. Man sagt, man hat den Punkt geerdet.

Um etwas zu erden, braucht man aber nicht einmal eine Leitung zur Erde zu legen. Der Schutzkontakt der Steckdose ist mit dem sogenannten Nullleiter des elektrischen Netzes verbunden, und dieser Nullleiter ist geerdet. Der Schutzkontakt der Steckdose befindet sich also auf 0 V, Abb. 16.28.

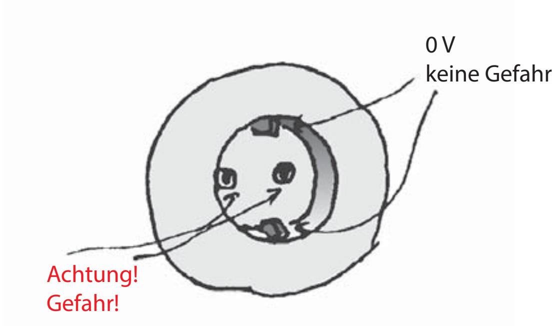


Abb. 16.28 Der Schutzkontakt der Steckdose befindet sich auf Erdpotenzial.

Nun zurück zu der Batterie, die vor dir auf dem Tisch steht. Wir kennen nach dem bisher Gesagten die Potenzialwerte von Plus- und Minusanschluss einzeln nicht, genauso wie wir die Höhenlagen der Enden des Meterstabes nicht kennen. Wir können aber bei der Batterie leicht klare Verhältnisse schaffen: Wir erden einen der beiden Anschlüsse. Abb. 16.29a zeigt eine Flachbatterie, deren Minusanschluss geerdet ist (beachte das Symbol für die Erde), d. h. es ist

$$\varphi^- = 0\ \text{V}\ .$$

Der Potenzialnullpunkt

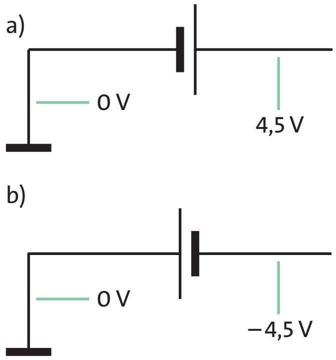


Abb. 16.29 (a) Der Minusanschluss der Batterie ist geerdet, der Plusanschluss hat ein Potenzial von +4,5 V. (b) Der Plusanschluss der Batterie ist geerdet. Der Minusanschluss hat ein Potenzial von −4,5 V.

Für den Plusanschluss ist daher

$$\varphi^+ = 4{,}5\ \text{V}\ .$$

In Abb. 16.29b ist der Plusanschluss geerdet. Daher ist hier

$$\varphi^+ = 0\ \text{V und } \varphi^- = -4{,}5\ \text{V}\ .$$

Das Potenzial des Minusanschlusses ist jetzt also negativ. In beiden Fällen, d. h. in Abb. 16.29a und Abb. 16.29b, ist aber

$$\varphi^+ - \varphi^- = 4{,}5\ \text{V}.$$

Die Wörter Plusanschluss und Minusanschluss haben sich eingebürgert, sind aber etwas irreführend. Sie legen nahe, dass sich der Plusanschluss immer auf positivem und der Minusanschluss auf negativem Potenzial befindet. Dass das nicht der Fall zu sein braucht, zeigt schon Abb. 16.29. In Abb. 16.29a hat der Minusanschluss das Potenzial 0 V, sein Potenzial ist also nicht negativ; und in Abb. 16.29b ist der Plusanschluss nicht positiv. In Abb. 16.30 sieht man es noch deutlicher. Hier sind eine 9-V-Batterie und ein 1000-V-Netzgerät „hintereinander geschaltet". Der Plusanschluss des Netzgeräts ist geerdet, sein Potenzial ist 0 V. Sein Minusanschluss liegt um 1000 V tiefer, d. h. bei −1000 V. Da der Plusanschluss der Batterie mit dem Minusanschluss des Netzgeräts verbunden ist, hat der Plusanschluss der Batterie das Potenzial −1000 V. Das Potenzial des Plusanschlusses der Batterie ist also negativ.

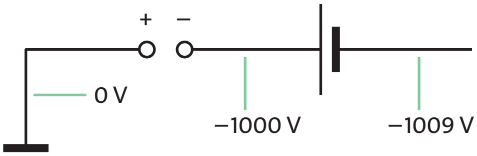


Abb. 16.30 Der Plusanschluss der Batterie hat ein Potenzial von minus tausend Volt.

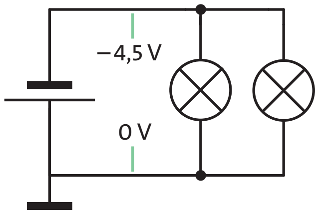


Abb. 16.31 Stromkreis, der an einer Stelle geerdet ist

Abb. 16.31 zeigt einen Stromkreis, der an einer Stelle geerdet ist.

Aufgaben

1. Die Batterien in Abb. 16.32a erzeugen eine Spannung von je 4,5 V. Auf welchen Potenzialen befinden sich die Punkte 1, 2 und 3?
2. Jede der Batterien in Abb. 16.32b erzeugt eine Potenzialdifferenz von 12 V. Auf welchen Potenzialen befinden sich die Punkte 1, 2 und 3?
3. Zwei 9-V-Batterien sind hintereinander geschaltet, Abb. 16.33a. Was zeigen die drei Voltmeter an?
4. Zeichne in Abb. 16.33b ein Voltmeter ein, das die Spannung zwischen den Anschlüssen der Lampe misst. Zeichne ein Voltmeter ein, das die Batteriespannung misst.
5. Nenne Beispiele für Stromkreise, die man nicht erden kann.

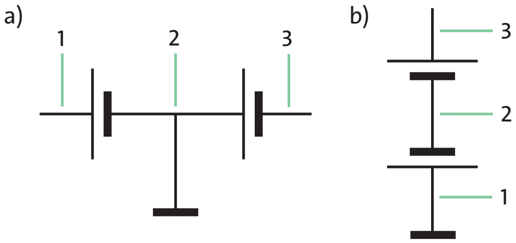


Abb. 16.32 Zu den Aufgaben 1 und 2

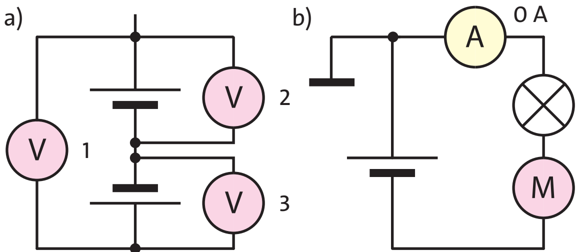


Abb. 16.33 Zu den Aufgaben 3 und 4

16.6 Antrieb und Stromstärke

Wir schließen einen Elektromotor einmal an eine 6-V- und einmal an eine 9-V-Batterie an, Abb. 16.34. Im zweiten Fall läuft der Motor schneller als im ersten. Am Amperemeter sehen wir, dass der elektrische Strom im zweiten Fall stärker ist als im ersten.

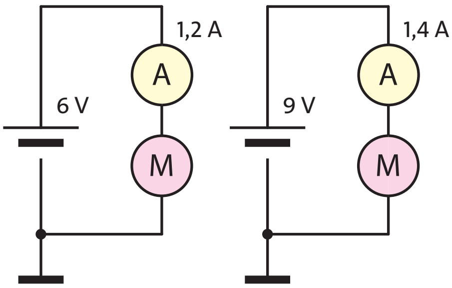


Abb. 16.34 Je höher die Spannung ist, die am Motor liegt, desto stärker ist der Strom, der durch den Motor fließt.

Wir schließen eine Lampe an ein regelbares Netzgerät an und drehen die Spannung langsam hoch. Je höher die Spannung ist, desto stärker ist der Strom, der durch die Lampe fließt.

Die beiden Experimente zeigen, was du sicher schon erwartet hast: Je höher die Spannung, desto stärker der Strom.

> Je größer die elektrische Potenzialdifferenz zwischen zwei Stellen (je größer der Antrieb) ist, desto stärker ist der elektrische Strom, der von der einen zur anderen Stelle fließt.

Wir schließen an eine Batterie nacheinander zwei verschieden gebaute Lämpchen an, Abb. 16.35. Wir stellen fest, dass der Strom, der durch das eine Lämpchen fließt, stärker ist als der, der durch das andere fließt. Offensichtlich setzen die beiden Lampen dem Strom nicht denselben Widerstand entgegen. Man sagt auch, die Lampen haben verschiedene Widerstände.

Wir haben gesehen, dass die Stärke des Stroms, der durch ein Gerät fließt (durch eine Lampe oder einen Motor zum Beispiel), von zwei Dingen abhängt:

- von der Spannung zwischen den Anschlüssen des Geräts;
- vom Widerstand, den das Gerät dem Strom entgegensetzt.

> Die Stärke des elektrischen Stroms, der durch ein Gerät fließt, ist umso größer,
> - je größer der Potenzialunterschied zwischen den Anschlüssen des Geräts ist;
> - je kleiner der Widerstand ist, den das Gerät dem Strom entgegensetzt.

16.7 Anwendungen

Wir lernen nun eine Methode kennen, die uns das Lösen elektrotechnischer Probleme erleichtert.

Immer wenn der Schaltplan einer elektrischen Anordnung vorgegeben ist, werden als Erstes die Leitungen farbig nachgezeichnet, und zwar so, dass alle Leitungen, die dasselbe Potenzial haben, auch dieselbe Farbe bekommen. Es ist klar, dass dabei ein durchgehender Draht eine einheitliche

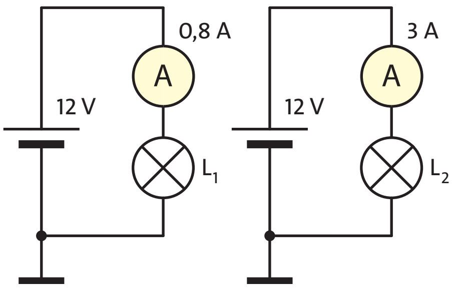


Abb. 16.35 Die Lampe im rechten Stromkreis hat einen geringeren Widerstand als die im linken.

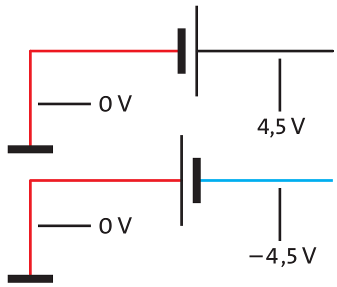


Abb. 16.36 Unterschiedliche Farben der Leitungen stehen für unterschiedliche Potenziale.

Farbe bekommt. Beim Durchgang durch ein elektrisches Gerät (Lampe, Motor, Batterie, Dynamo etc.) ändert sich gewöhnlich die Farbe.

Die Abb. 16.36 bis Abb. 16.38 zeigen einige Beispiele.

In Abb. 16.36 ist die Batterie von Abb. 16.29 mit ihren Zuleitungen nach der neuen Methode dargestellt.

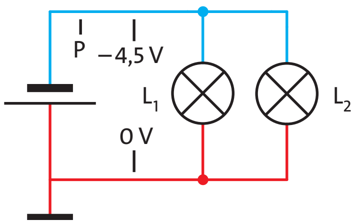


Abb. 16.37 Die Schaltung von Abb. 16.31. Die Potenziale sind durch verschiedene Farben gekennzeichnet.

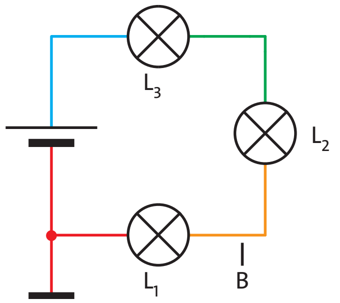


Abb. 16.38 In dieser Schaltung kommen vier verschiedene Potenzialwerte vor.

Abb. 16.37 zeigt noch einmal die parallelgeschalteten Lampen von Abb. 16.31, und Abb. 16.38 zeigt einen Stromkreis, in dem vier verschiedene Potenzialwerte vorkommen.

Wir wollen das farbige Kennzeichnen der Leitungen auf zwei Probleme anwenden:

1. Die Lampen 1 und 2 in Abb. 16.37 sind gleich gebaut. An der Stelle P fließt ein Strom von 3 A. Wie groß ist die Stromstärke in Lampe 1 und wie groß in Lampe 2?

Da für die Verzweigungspunkte die Knotenregel gilt, ist

$$I_{L1} + I_{L2} = 3\ \text{A}.$$

(I_{L1} und I_{L2} sind die Stromstärken in den Lampen.) Wir sehen nun an der farbigen Kennzeichnung, dass an beiden Lampen dieselbe Spannung liegt (nämlich dieselbe wie an der Batterie). Der elektrische Strom hat also in beiden Lampen denselben Antrieb. Da die Lampen gleich gebaut sind, müssen auch die Ströme in beiden Lampen gleich stark sein, also

$$I_{L1} = I_{L2} = 1{,}5\ \text{A}.$$

2. Der Leitungsabschnitt B in Abb. 16.38 befindet sich auf einem Potenzial von 6 V. Die Lampen 1, 2 und 3 sind gleichartig gebaut. Welche Spannung erzeugt die Batterie?

Da der Stromkreis nicht verzweigt ist, ist die Stromstärke überall dieselbe. Die Spannung an Lampe 1 beträgt 6 V. Sie stellt den Antrieb für den Strom durch Lampe 1 dar. Da derselbe Strom durch die Lampen 2 und 3 fließt, und diese Lampen genauso gebaut sind wie Lampe 1, braucht die Elektrizität, um durch diese Lampen hindurchzukommen, denselben Antrieb wie in Lampe 1, nämlich je 6 V. Wenn man sich also vom Plusanschluss der Batterie über die drei Lampen zum Minusanschluss bewegt, geht es in drei 6-V-Schritten auf 0 V hinunter. Der Plusanschluss muss daher auf 18 V liegen.

In den beiden Beispielen war das Potenzial am Eingang einer Lampe anders als am Ausgang. Diese Regel gilt aber nicht immer. Eine Lampe, durch die kein elektrischer Strom fließt, muss an Eingang und Ausgang dasselbe Potenzial haben, andernfalls flösse ja ein Strom. Abb. 16.39 zeigt zwei Beispiele.

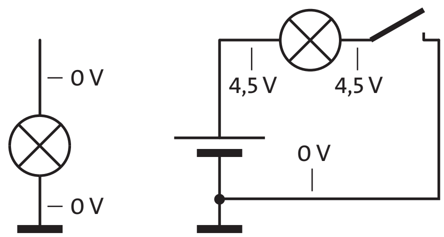


Abb. 16.39 Da durch die Lampe kein Strom fließt, müssen sich ihre Anschlüsse auf gleichem Potenzial befinden.

Aufgaben

1. Die Batterien in Abb. 16.40a sind 4,5-V-Flachbatterien. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials, und gib die Potenzialwerte für alle Leitungsabschnitte an.
2. Die Stärke des elektrischen Stroms, der durch die Batterie in Abb. 16.40b fließt, beträgt 1,6 A. Kennzeichne Stellen gleichen Potenzials. Wie stark ist der Strom in den Lampen?
3. Das elektrische Potenzial an der Stelle C in Abb. 16.41 ist 20 V. Die drei Lampen sind gleichartig gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials. Gib die Potenzialwerte für die Leitungsabschnitte A, B und D an. Welche Spannung liefert die Batterie? Was passiert mit den Potenzialen, wenn der Schalter geöffnet wird?
4. Die Batteriespannung in Abb. 16.42a und Abb. 16.42b beträgt 12 V. Die Lampen sind gleich gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials. Welchen Wert hat das Potenzial im Punkt P? Wie groß sind die Potenzialunterschiede an den Lampen L_1 und L_2? Ist die Stärke des Stroms durch Lampe L_1 größer, wenn der Schalter geschlossen ist (Abb. 16.42a) oder wenn er offen ist (Abb. 16.42b)? Wann ist der Strom durch die Lampe L_2 stärker: wenn der Schalter offen ist oder wenn er geschlossen ist?
5. Die Spannung am Netzgerät in Abb. 16.43a und Abb. 16.43b beträgt 150 V, die Lampen sind gleichartig gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials. Gib die Potenzialwerte aller Leitungsabschnitte an. Welche Lampe leuchtet noch, wenn der Schalter geöffnet ist?
6. Die Batterien in Abb. 16.44a und Abb. 16.44b haben eine Spannung von 9 V. Die Lampen sind gleich gebaut. Kennzeichne die Stellen gleichen Potenzials, und gib die Potenzialwerte aller Leitungsabschnitte an.

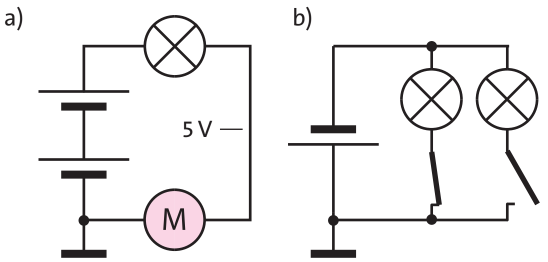


Abb. 16.40 Zu den Aufgaben 1 und 2

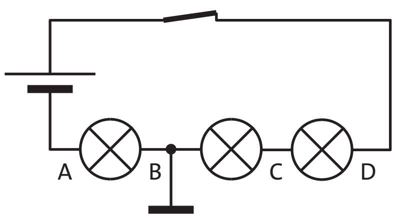


Abb. 16.41 Zu Aufgabe 3

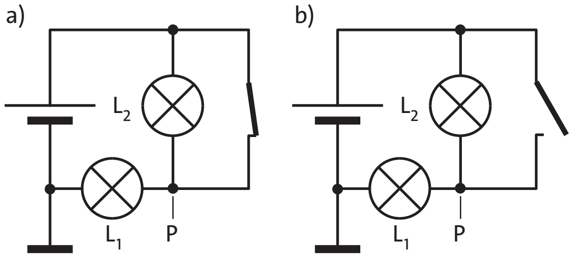


Abb. 16.42 Zu Aufgabe 4

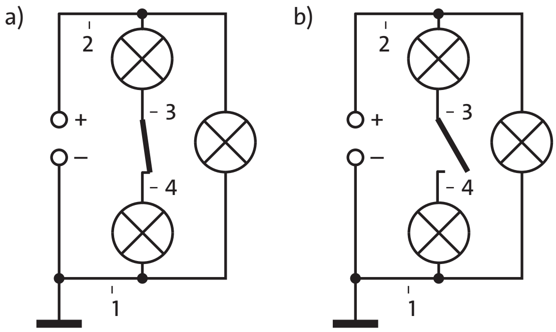


Abb. 16.43 Zu Aufgabe 5

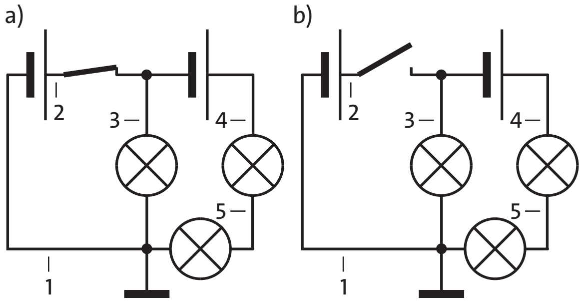


Abb. 16.44 Zu Aufgabe 6

16.8 Der elektrische Widerstand

Wenn man möchte, dass durch einen Gegenstand ein elektrischer Strom fließt, legt man eine Spannung an, man sorgt für einen Antrieb. Jeder Gegenstand neigt aber dazu, den Strom zu behindern. Er setzt der fließenden Elektrizität einen Widerstand entgegen. Er hat einen Widerstand.

Manche Gegenstände haben einen großen Widerstand, sie leiten den elektrischen Strom schlecht oder gar nicht. Andere haben einen geringen Widerstand, sie leiten die Elektrizität gut.

Elektrische Kabel zum Beispiel haben einen kleinen Widerstand. Das heißt aber nicht, dass sie gar keinen Widerstand haben.

Wie der elektrische Strom, der durch einen Gegenstand hindurchfließt, auf die angelegte Spannung reagiert, kann eine komplizierte Sache sein. Wenn man die Spannung erhöht, nimmt die Stromstärke gewöhnlich — aber nicht immer — zu.

Wir wollen den Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke für verschiedene elektrische Geräte untersuchen. Abb. 16.45 zeigt, wie man es macht: Wir schließen den zu untersuchenden Gegenstand an ein Netzgerät an, dessen Spannung man verändern kann. Diese Spannung kann am Einstellknopf des Netzgeräts abgelesen werden. (Wenn man sich auf die Skala an diesem Knopf nicht verlassen will, kann man die Spannung natürlich auch nachmessen.)

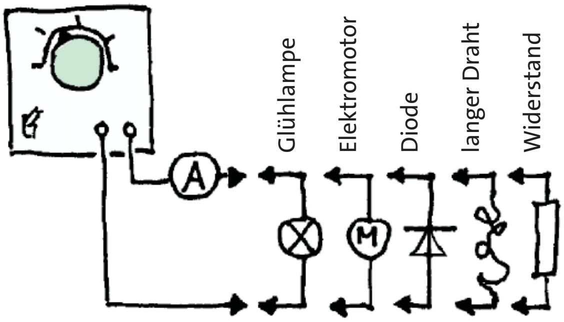


Abb. 16.45 Die Aufnahme von Kennlinien: Man gibt verschiedene Spannungswerte vor und misst jeweils die Stärke des durch die Spannung verursachten elektrischen Stroms.

Die Stärke des elektrischen Stroms, den die Spannung verursacht, wird an einem Amperemeter abgelesen. Wir geben der Spannung verschiedene Werte und lesen für jeden eingestellten Spannungswert die Stromstärke ab. Die so erhaltenen Wertepaare werden zunächst in einer Wertetafel festgehalten. Tab. 16.4 zeigt eine solche Wertetafel für eine 6-V-Glühlampe.

Die Messwerte werden als Nächstes in ein U-I-Koordinatensystem übertragen. Die so erhaltenen Punkte werden dann durch eine möglichst glatte Linie miteinander verbunden. Die Kurve,

U in V	*I* in A	*U* in V	*I* in A	*U* in V	*I* in A
−6	−2,7	−2	−1,6	3	2,0
−5	−2,5	−1	−1,0	4	2,3
−4	−2,3	0	0	5	2,5
−3	−2,0	1	1,0	6	2,7
		2	1,6		

Tab. 16.4 Wertetafel für die Kennlinie einer Glühlampe

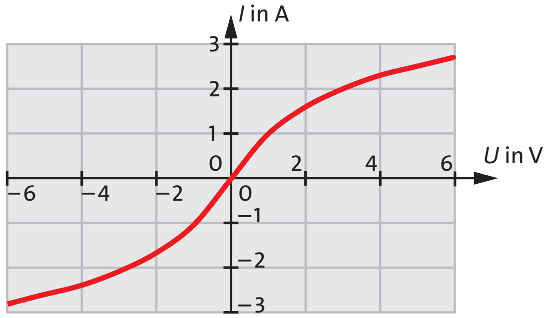


Abb. 16.46 Kennlinie einer Glühlampe. Die zugehörige Wertetafel zeigt Tab. 16.4.

die man so erhält, ist die Kennlinie des untersuchten Gegenstandes oder Geräts. Abb. 16.46 zeigt die Kennlinie unserer 6-V-Glühlampe.

Wenn man die Kennlinie eines Geräts hat, kann man sofort sagen, wie stark der elektrische Strom ist, der bei einer vorgegebenen Spannung durch das Gerät fließt.

Wir haben die Spannung an unserer Glühlampe auch umgekehrt. Ein Umkehren der Spannung hat zur Folge, dass sich die Richtung des elektrischen Stroms umkehrt. Bei der Glühlampe besteht zwischen positivem und negativem Teil der Kurve eine Punktsymmetrie.

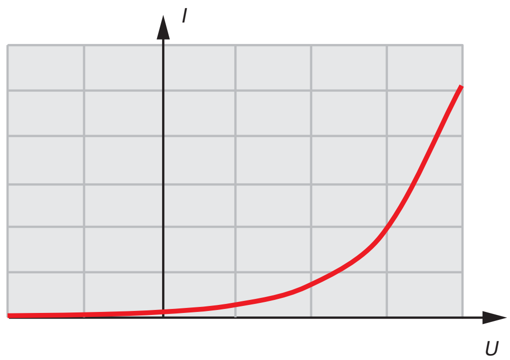


Abb. 16.47 Die Kennlinie einer Diode ist nicht punktsymmetrisch.

Abb. 16.47 zeigt die Kennlinie einer Diode. Man sieht, dass die Kurve keine Punktsymmetrie hat. Falls du nicht wusstest wozu man eine Diode verwendet, kannst du es dir jetzt mithilfe der Kennlinie überlegen. Die Kennlinie zeigt, dass die Diode den elektrischen Strom in einer Richtung gut, und in der anderen fast gar nicht durchlässt. Sie ist daher für den elektrischen Strom dasselbe wie ein Fahrradventil für den Luftstrom.

Wir untersuchen einen Elektromotor. Die Situation ist hier komplizierter als in den vorangehenden Fällen: Je nach Belastung des Motors erhält man eine andere Kennlinie. Alle drei Kennlinien in Abb. 16.48 wurden mit demselben Motor aufgenommen. Bei der einen lief der Motor völlig frei, er war unbelastet. Die elektrische Stromstärke blieb immer recht klein. Die zweite Kennlinie wurde bei mittlerer Belastung aufgenommen und die dritte bei blockierter Motorwelle.

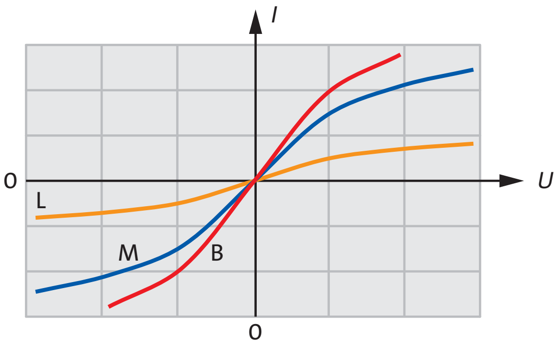


Abb. 16.48 Die Kennlinie eines Elektromotors hängt von der Belastung des Motors ab für Leerlauf (L), mittlere Belastung (M) und blockierte Motorwelle (B).

In Abb. 16.49 ist eine besonders einfache Kennlinie dargestellt: die Kennlinie eines langen Drahtes. Sie hat die Form einer Ursprungsgerade. Wir hatten bisher immer angenommen, dass ein Draht überhaupt keinen Widerstand hat. Du siehst jetzt, dass das nicht zutrifft. Der Widerstand ist zwar klein, aber er ist vorhanden. Die Kennlinie des Drahtes zeigt, dass die Stromstärke proportional zur angelegten Spannung ist. Man sagt, der Draht befolge das Ohm'sche Gesetz.

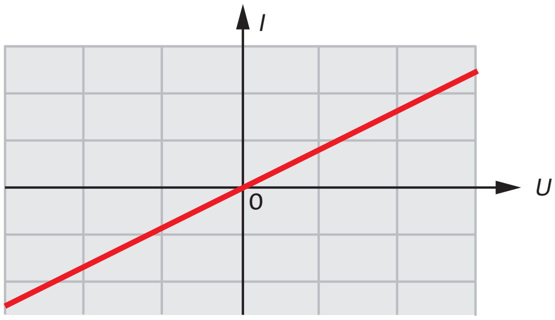


Abb. 16.49 Kennlinie eines langen Drahtes. Der Draht befolgt das Ohm'sche Gesetz.

Ohm'sches Gesetz: $I \sim U$

Abb. 16.50 zeigt Kennlinien von zwei verschiedenen Drähten. Bei gleichem Antrieb ist der Strom in Draht B schwächer als in Draht A. B hat also einen größeren Widerstand als A.

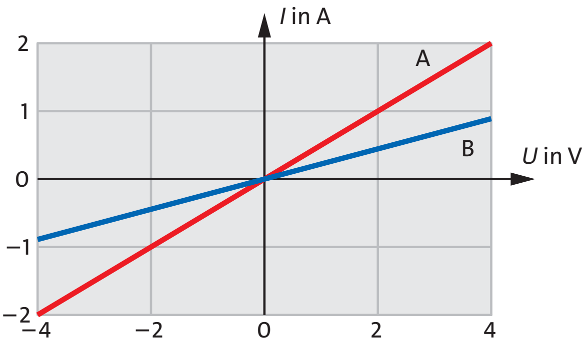


Abb. 16.50 Kennlinien von zwei Drähten mit unterschiedlichen Widerständen

Man kann den Widerstand eines Drahtes charakterisieren, indem man den Quotienten aus Spannung und Stromstärke bildet. Für den einen Draht hat er einen bestimmten festen Wert, für den anderen hat er einen anderen festen Wert. Je größer der Widerstand des Drahtes ist, desto größer ist dieser Quotient. Wir nennen daher auch den Quotienten selbst den Widerstand des Drahtes, und wir bezeichnen ihn mit dem Buchstaben R:

Elektrischer Widerstand: $R = \dfrac{U}{I}$

Der Widerstand R ist eine physikalische Größe. Als Maßeinheit ergibt sich Volt/Ampere (V/A). Statt des zusammengesetzten Ausdrucks Volt/Ampere benutzt man die Bezeichnung Ohm. Die

Maßeinheit Ohm wird abgekürzt durch den griechischen Buchstaben Ω (sprich Omega). Es ist also

$$\Omega = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$$

Wir können damit den Widerstand unserer beiden Drähte in Abb. 16.50 angeben. Draht A hat einen Widerstand von 2 Ω, Draht B hat einen Widerstand von 5 Ω.

Ist die Kennlinie eines Geräts keine Gerade, so hat es nicht viel Sinn, einen Quotienten U/I zu bilden. Dieser Quotient hätte für jeden Punkt der Kennlinie einen anderen Wert.

Kann man etwas tun, um den Widerstand eines Drahtes zu verringern? Dazu müsste man wissen, wovon der Widerstand abhängt. Wir können uns an unseren Erfahrungen mit Wasserschläuchen orientieren. Der Widerstand eines Drahtes ist umso größer,

- je länger der Draht ist,
- je dünner der Draht ist.

Außerdem hängt er noch davon ab, aus welchem Material der Draht besteht. Vergleicht man Drähte, die gleich lang und gleich dick sind, aber aus verschiedenen Stoffen bestehen, so findet man, dass Drähte aus Silber und aus Kupfer den geringsten Widerstand haben, sie leiten den elektrischen Strom etwa gleich gut. Der Widerstand eines Aluminiumdrahtes ist etwa doppelt so groß und der eines Eisendrahtes etwa sechsmal so groß wie der eines Kupferdrahtes.

In Abb. 16.51 ist der Zusammenhang zwischen elektrischer Stromstärke, Potenzialunterschied

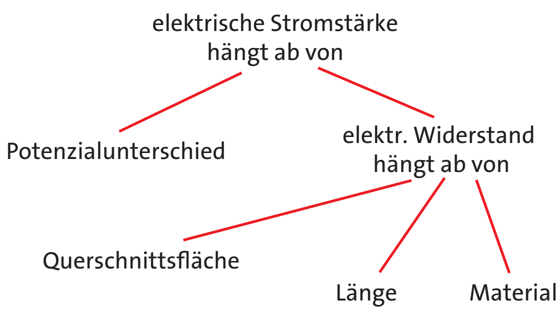


Abb. 16.51 Zusammenhang zwischen elektrischer Stromstärke, Potenzialunterschied und Eigenschaften der Leitung

und den Eigenschaften der Leitung schematisch dargestellt.

Wir können nun auch verstehen, wie eine Glühlampe funktioniert. Sie ist im Wesentlichen nur eine enge Stelle im Stromkreis: ein Stück Leitung, das dem elektrischen Strom einen großen Widerstand entgegensetzt. Die Elektrizität, die durch die enge Stelle fließt, hat eine Art Reibungswiderstand zu überwinden. Dabei wird, wie bei jedem Reibungsvorgang, Entropie erzeugt, und das hat zur Folge, dass die Temperatur des Drahtes steigt.

Nach demselben Prinzip arbeiten die meisten elektrischen Heizungen: Kochplatte, Bügeleisen, die Heizung im Föhn etc. Anders dagegen funktioniert der Mikrowellenherd und die Leuchtstofflampe.

Es kommt in der Elektrotechnik und in der Elektronik oft vor, dass man einen elektrischen Strom absichtlich behindern möchte. Ein Widerstand ist also erwünscht. Man stellt deshalb Geräte oder „Bauelemente“ her, die keine andere Funktion haben, als einem Strom einen Widerstand entgegenzusetzen. Man nennt diese Bauelemente Widerstände. Widerstände sind so gebaut, dass sie eine lineare Kennlinie haben. Sie befolgen also das Ohm’sche Gesetz, und man kann sie durch die Angabe eines Widerstandswertes, d. h. einer Ohmzahl, charakterisieren. Abb. 16.45 zeigt das Schaltsymbol eines Widerstandes.

> Für technische Widerstände ist $I \sim U$.

Hast du bemerkt, dass man das Wort Widerstand in drei verschiedenen Bedeutungen verwendet? Dann solltest du diesen (hässlichen) Satz verstehen: „Dieser Widerstand, der einen Widerstand von 10 kΩ hat, setzt dem elektrischen Strom einen zu kleinen Widerstand entgegen.“

Aufgaben

1. An einen unbekannten Widerstand wird eine Spannung von 20 V gelegt. Man misst eine elektrische Stromstärke von 4 mA. Wie viel Ω hat der Widerstand?
2. An einen 2-kΩ-Widerstand wird eine Spannung von 120 V gelegt. Wie stark ist der elektrische Strom, der durch den Widerstand fließt?

Aufgaben

3. Durch einen 1-MΩ-Widerstand fließt ein elektrischer Strom von 0,1 mA. Welche Spannung liegt am Widerstand?
4. Das Netzgerät in Abb. 16.52a erzeugt eine Spannung von 35 V. Das Amperemeter zeigt 5 A an und das Voltmeter 10 V. Wie groß ist der Widerstand von R_1? Wie groß ist die Spannung an Widerstand R_2? Wie groß ist der Widerstand von R_2?
5. Die Spannung der Batterie in Abb. 16.52b beträgt 12 V. Jeder der Widerstände hat 100 Ω. Gib die Potenzialwerte aller Leitungsabschnitte an. Welche Spannungen liegen an den drei Widerständen? Wie stark sind die elektrischen Ströme, die durch die drei Widerstände fließen? Wie stark ist der elektrische Strom, der durch die Batterie fließt?
6. Du findest in einer Kiste mit alten elektronischen Bauteilen mehrere kleine Geräte, bei denen nicht mehr zu erkennen ist, wozu sie dienen. Du nimmst für drei dieser Geräte die Kennlinien auf und findest die in Abb. 16.53 dargestellten Zusammenhänge. Um was für Bauteile handelt es sich? Mach möglichst genaue Angaben.
7. Zwei 100-Ω-Widerstände werden parallel geschaltet, Abb. 16.54a. Wie groß ist der Widerstand der gesamten Anordnung. Formuliere eine Regel.
8. Zwei 100-Ω-Widerstände werden hintereinander geschaltet, Abb. 16.54b. Wie groß ist der Widerstand der gesamten Anordnung? Formuliere eine Regel.

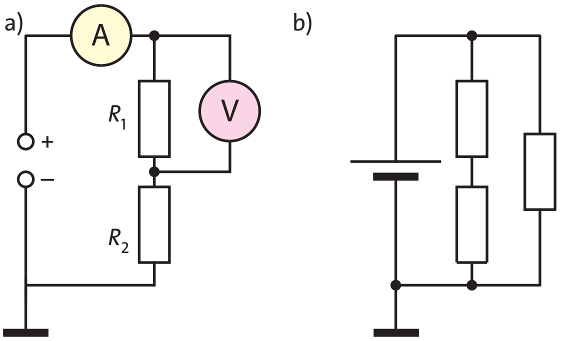


Abb. 16.52 (a) Zu Aufgabe 4; (b) zu Aufgabe 5

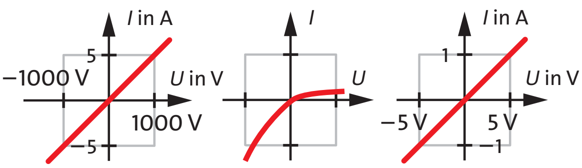


Abb. 16.53 Zu Aufgabe 6

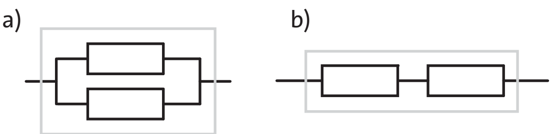


Abb. 16.54 (a) Zu Aufgabe 7; (b) zu Aufgabe 8

16.9 Der Kurzschluss – die Sicherung

In Abb. 16.55a sind die beiden Anschlüsse der Batterie direkt über ein Kabel miteinander verbunden. In Abb. 16.55b berühren sich die beiden Leitungen des Kabels, das zu einem Motor führt. In beiden Fällen fließt die Elektrizität direkt vom einen zum anderen Anschluss der Energiequelle, ohne den Umweg über ein elektrisches Gerät zu gehen, das als Energieempfänger arbeitet. Man nennt diese Situation einen Kurzschluss.

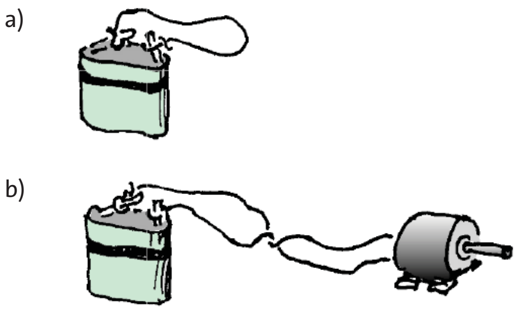


Abb. 16.55 Kurzschluss: Die Elektrizität geht nicht den Umweg über den Energieverbraucher.

Der Stromkreis, der durch den Kurzschluss entsteht, hat einen sehr geringen Widerstand. Daher fließt ein sehr starker Strom. Der elektrische Strom kann bei einem Kurzschluss so stark sein, dass es gefährlich wird: Die Leitungen können heiß werden und anfangen zu glühen.

Wie stark der Strom wird, hängt von der Quelle ab. Bei einer Flachbatterie, einer Monozelle und ähnlichen Quellen ist die Gefahr nicht groß: Die Stromstärke erreicht nur einige Ampere. Beim Autoakku ist es schon ganz anders: Die Stromstärke im Kurzschluss kann einige Hundert Ampere betragen. Und bei der Steckdose wäre sie noch viel größer, wenn nicht die Haussicherung das Fließen eines sehr starken Stroms verhinderte.

Eine Sicherung hat die Aufgabe, den Stromkreis zu unterbrechen, sobald die elektrische Stromstärke einen bestimmten Wert überschreitet. Bei der Haussicherung ist die Maximalstärke gewöhnlich 10 A oder 16 A.

Wenn man eine Batterie kurzschließt, wird sie leer. „Leer“ bedeutet hier: leer an Energie.

Wo bleibt nun aber diese Energie? Zum einen werden, wie wir schon wissen, die Leitungen warm. Und zum Erwärmen des Drahtes (zur Entropieerzeugung im Draht) wird Energie gebraucht. Dies ist aber nur ein kleiner Teil der Energie, die die Batterie verliert. Und außerdem: Wenn man die Batterie mit einem Draht mit sehr kleinem Widerstand kurzschließt, so wird der Draht fast gar nicht warm. Wo bleibt also die Energie?

Wenn du bereit bist, eine Monozelle zu opfern, kannst du es selbst ausprobieren. Du überbrückst sie mit einem kurzen, dicken Draht. Der Draht wird nicht warm – aber die Monozelle wird warm. Es wird also beim Kurzschluss in der Energiequelle selbst Entropie erzeugt. Die Energie verlässt die Quelle nicht mehr mit dem Energieträger Elektrizität, sondern mit dem Energieträger Entropie.

16.10 Wechselstrom

Aus zwei Flachbatterien und einem Wechselschalter bauen wir eine etwas ungewöhnliche elektrische Energiequelle zusammen, und wir schließen eine Lampe an, Abb. 16.56.

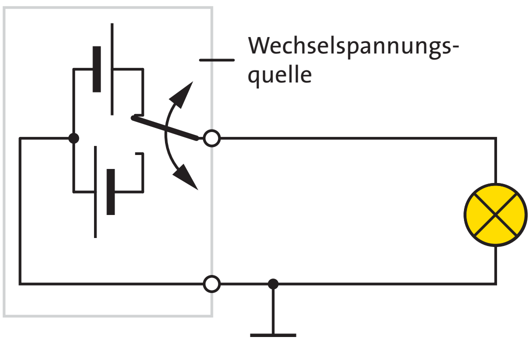


Abb. 16.56 Wechselspannungsquelle. Der eine Anschluss hat ständig Erdpotenzial. Das Potenzial des anderen Anschlusses wechselt zwischen einem positiven und negativen Wert hin und her.

Wir legen nun den Schalter in regelmäßigen Zeitabständen um, z. B. alle 3 Sekunden. Dabei bleibt die untere Leitung ständig auf 0 V, die obere springt zwischen den Potenzialwerten +4,5 V und –4,5 V hin und her.

Abb. 16.57 zeigt das Potenzial der oberen Leitung als Funktion der Zeit. Man sagt, an der Glühlampe liege eine Wechselspannung. Diese Wechselspannung treibt den elektrischen Strom immer abwechselnd in der einen und in der anderen Richtung durch die Glühlampe. Es fließt ein Wechselstrom.

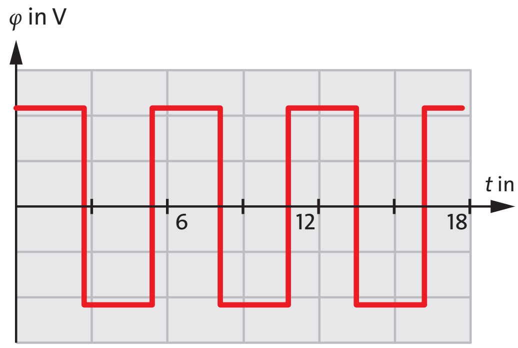


Abb. 16.57 Potenzial der oberen Leitung in Abb. 16.56 als Funktion der Zeit

Auch zwischen den Anschlüssen der Steckdose liegt eine Wechselspannung. Der eine Anschluss liegt immer auf Erdpotenzial. Das Potenzial des anderen Anschlusses wird immer abwechselnd positiv und negativ. Es gibt aber einige Unterschiede zu der selbst gebauten Quelle von Abb. 16.56:

- Das Potenzial des nicht geerdeten Anschlusses der Steckdose wechselt viel schneller, nämlich 100-mal pro Sekunde. Es wird 50-mal pro Sekunde positiv und 50-mal negativ. Man sagt, die Frequenz betrage 50 Hertz.
- Das Potenzial des nicht geerdeten Anschlusses ändert sich nicht sprunghaft, sondern stetig,

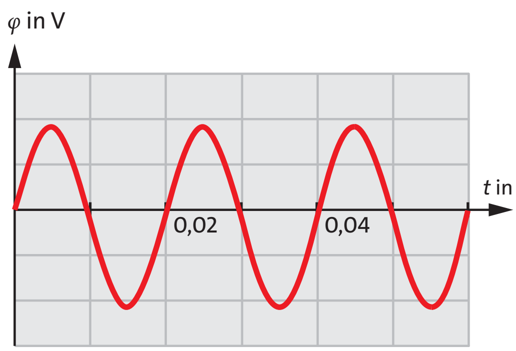


Abb. 16.58 Potenzial des nicht geerdeten Anschlusses der Steckdose als Funktion der Zeit

wellenförmig, so wie es Abb. 16.58 zeigt. Man nennt einen solchen Zusammenhang eine Sinusfunktion. Die Spannung zwischen den Anschlüssen der Steckdose ändert sich entsprechend. Sie erreicht zweimal pro Schwingung (also 100-mal pro Sekunde) ihren höchsten Wert, die Spitzenspannung. Außerdem hat sie zweimal pro Schwingung den Wert 0 Volt.

Wir wollen nun etwas mit Wechselspannungen experimentieren. Wir verwenden dazu einen Sinusgenerator: ein Netzgerät, das eine sinusförmige Wechselspannung liefert und dessen Frequenz man beliebig einstellen kann.

Wir schließen ein Glühlämpchen an den Sinusgenerator an und stellen das Gerät zunächst so ein, dass die Spannung eine Schwingung pro Sekunde macht, und dass die Spitzenspannung 5 V beträgt. Wie zu erwarten war, geht das Lämpchen in schneller Folge an und aus, zweimal pro Sekunde. Immer wenn die Spitzenspannung erreicht ist, leuchtet es hell, so hell als wäre es an eine 5-V-Gleichspannungsquelle angeschlossen. Zu allen anderen Zeitpunkten leuchtet die Lampe weniger hell oder gar nicht.

Wir erhöhen nun die Frequenz des Sinusgenerators (wobei wir darauf achten, dass die Spitzenspannung gleich bleibt). Das Lämpchen flackert jetzt immer schneller und schneller. Schließlich, wenn die Frequenz etwa 20 Schwingungen pro Sekunde (20 Hertz) erreicht hat, leuchtet die Lampe ganz gleichmäßig. Der Glühfaden ist zu träge, um den schnellen Spannungswechseln zu folgen. Allerdings leuchtet die Lampe jetzt nicht so hell, wie sie bei einer Gleichspannung von 5 V leuchten würde. Sie bekommt ja im Mittel weniger Energie als sie von einer 5-V-Gleichspannungsquelle bekäme.

Wir schließen nun zum Vergleich ein zweites Lämpchen (das genauso gebaut ist wie das erste) an ein Gleichspannungsnetzgerät an und stellen die Spannung so ein, dass das zweite Lämpchen genauso hell leuchtet wie das erste.

Wir stellen fest, dass man dazu etwa 3,5 V Gleichspannung braucht. Bei einer Wechselspannung, deren Spitzenwert 5 V beträgt, bekommt also eine Lampe im Mittel genauso viel Energie wie bei einer Gleichspannung von 3,5 V. Man sagt daher, die Wechselspannungsquelle habe eine Effektivspannung von 3,5 V.

Der genaue Umrechnungsfaktor zwischen Effektiv- und Spitzenspannung ist $\sqrt{2}$. Es ist also

$$\text{Spitzenspannung} = \sqrt{2} \cdot \text{Effektivspannung}$$

Wenn jemand im Zusammenhang mit einer Wechselspannung einfach von der Spannung spricht, meint er stets die Effektivspannung. Auch die 230 V der Steckdose stellen die Effektivspannung dar. Die Spitzenspannung der Steckdose beträgt

$$230\ \text{V} \cdot \sqrt{2} \approx 325\ \text{V}.$$

Und auch die Spannung, die ein Wechselspannungsvoltmeter anzeigt, ist die Effektivspannung.

Die wichtigste Frage ist noch nicht geklärt: Wozu diese Umstände? Warum benutzt man so gern Wechselspannungen? Die Antwort: Weil es eine sehr bequeme Methode gibt, Wechselspannungen zu verändern, nämlich mit einem Transformator. Ein Transformator ist ein Gerät, das Spannungen herauf- oder heruntersetzt. Er tut das mit nur sehr geringen Energieverlusten. Allerdings kann er nur Wechselspannungen verarbeiten.

Wie ein Transformator funktioniert, und warum man Spannungen so gern herauf- und heruntertransformiert, werden wir später sehen.

16.11 Die Gefahren des elektrischen Stroms

Der elektrische Strom ist gefährlich. Das weiß jeder. Aber was genau ist daran gefährlich? Was darf man tun und was nicht? Worauf muss man achten?

Ein elektrischer Strom, der durch den menschlichen Körper fließt, hat schädliche Wirkungen. Eine Stromstärke von 50 mA kann tödlich sein.

Durch unseren Körper fließt natürlich nur dann ein elektrischer Strom, wenn man zwei Stellen berührt, die sich auf verschiedenem Potenzial befinden. Den Spatzen auf der elektrischen Leitung passiert nichts, denn sie berühren nur einen einzigen Leiter.

Man darf aber nicht glauben, man könnte ruhig einen Anschluss der Steckdose berühren, solange man nicht auch den anderen berührt. Wenn nämlich die Verbindung zur Erde über unsere Füße gut leitend ist, hat man schon den zweiten Berührungspunkt.

Der eine der beiden Anschlüsse der Steckdose wäre übrigens tatsächlich ungefährlich: Er befindet sich ja auf Erdpotenzial. Diesen geerdeten Anschluss könnten wir also berühren, uns würde nichts passieren. Nun sehen aber beide Anschlüsse der Steckdose gleich aus, sodass wir nicht wissen, welches der gefährliche und welches der ungefährliche Anschluss ist.

> Berühre nicht die beiden Anschlüsse der Steckdose. Berühre auch nicht einen einzigen Anschluss der Steckdose.

Die Netzspannung kann aber auch auf andere Art gefährlich werden. Wenn nämlich ein Gerät feucht geworden ist, kann das Wasser eine leitende Verbindung herstellen zwischen unserer Hand und irgendeinem Leiter im Innern des Geräts, der sich auf 230 V befindet. Man kann also auch einen Schlag bekommen, wenn man Teile eines Apparats berührt, die normalerweise isolieren, etwa den Plastikgriff des Föhns.

Feuchtigkeit an elektrischen Geräten ist deshalb besonders gefährlich, weil das Wasser an der Berührungsstelle einen besonders guten Kontakt zu unserem Körper herstellen kann.

> Vermeide beim Arbeiten mit elektrischen Geräten Feuchtigkeit.

Wenn ein elektrisches Gerät ein Metallgehäuse hat, oder wenn andere Metallteile des Geräts der Berührung zugänglich sind, gibt es noch eine weitere Gefahrenquelle. Die Isolation einer Leitung, die auf hohem Potenzial liegt, könnte defekt werden, und die Leitung könnte ein solches Metallteil berühren. Dieses Metallteil läge dann ebenfalls auf hohem Potenzial. Um dieser Gefahr zu begegnen, wird das Gehäuse des Geräts über den sogenannten Schutzleiter auf Erdpotenzial gelegt.

Die Schutzkontakte der Steckdose liegen auf Erdpotenzial. Das Gehäuse eines Geräts, das man anschließt, der Waschmaschine zum Beispiel, wird über den Schutzleiter — die dritte, gelb-grün markierte Leitung des dreiadrigen Kabels — mit dem Schutzkontakt der Steckdose verbunden, Abb. 16.59. Kommt nun ein Leiter, der auf 230 V liegt, mit dem Gehäuse in Berührung, so gibt es einen Kurzschluss, und die Haussicherung unterbricht den Stromkreis.

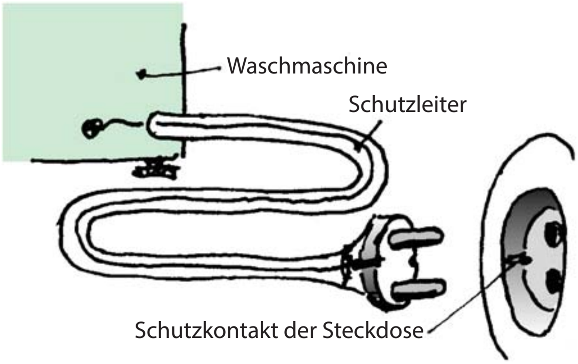


Abb. 16.59 Das Gehäuse der Waschmaschine ist über den Schutzleiter mit der Erde verbunden.

Oft hat man es mit anderen Spannungen als 230 V zu tun. Welche Spannungen sind denn überhaupt gefährlich? Welche Spannungswerte verursachen im Körper einen Strom, der gefährlich ist? Das hängt davon ab, wie man die Leiter, zwischen denen die Spannung liegt, berührt.

Berührt man sie mit zwei Fingerspitzen derselben Hand, so ist die Gefahr kleiner. Wegen der kleinen Kontaktfläche ist die Stromstärke klein. Außerdem fließt der Strom nur durch die eine Hand, sodass auch nur dieser Hand etwas passieren kann.

Fasst man dagegen zwei Leiter, die auf verschiedenem Potenzial liegen, mit je einer Hand an, so ist die Gefahr viel größer. Wegen der großen Kontaktfläche (mit der ganzen Hand) ist die Stromstärke groß; außerdem fließt der Strom, um von der einen Hand zur anderen zu kommen, zum Teil wenigstens, durch das Herz — und das ist besonders gefährlich. Um kein Risiko einzugehen, soll man die Berührung bei Spannungen über 40 V vermeiden.

> Berühre nie zwei Leiter, zwischen denen eine Spannung von mehr als 40 V liegt.

Manchmal laden sich Kleidungsstücke elektrisch auf. Die Spannung gegen Erde kann dabei einige zig kV betragen (1 kV = 1000 V). Die Berührung ist trotzdem ungefährlich, denn die Kleidungsstücke entladen sich sehr schnell, sodass die Stromstärke gefährliche Werte höchstens eine Mikrosekunde (eine Millionstel Sekunde) lang überschreitet — und deshalb ist der Strom wieder ungefährlich.

Aufgaben

1. Ein nicht angeschlossener Föhn ist ins Wasser gefallen. Warum ist es gefährlich, ihn gleich nach dem Herausnehmen aus dem Wasser wieder zu benutzen?
2. In einer Waschmaschine hat sich die Isolierung einer der Leitungen des Netzkabels durchgerieben, sodass die Leitung Kontakt mit dem Gehäuse der Waschmaschine hat. Beim Einschalten der Waschmaschine kann zweierlei passieren.

17 ELEKTRIZITÄT UND ENERGIE

17.1 Die Elektrizität als Energieträger

Lampen, Elektromotoren, Elektroherde, Tauchsieder und andere elektrische Geräte brauchen Energie. Sie bekommen die Energie mit dem Energieträger Elektrizität. Die Quelle ist in den meisten Fällen ein Elektrizitätswerk.

Von der Quelle zum Empfänger fließt ein Energiestrom. In jeder Sekunde fließt eine bestimmte Energiemenge, eine bestimmte Zahl von Joules. Du erinnerst dich: Die Energiemenge E, die während der Zeitdauer t irgendwo vorbeifließt, dividiert durch die Zeitdauer t nennt man Energiestromstärke P, oder als Formel

$$P = \frac{E}{t} \,.$$

Als Maßeinheit von P ergibt sich

Joule/Sekunde = J/s.

Als Abkürzung für Joule pro Sekunde benutzt man „Watt". Es ist also Watt = Joule/Sekunde oder

$$\mathrm{W} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$$

Um Energie elektrisch (mit dem Träger Elektrizität) zu transportieren, braucht man ein zweiadriges Kabel, ein Kabel, das aus zwei Leitungen besteht. In den Leitungen fließt ein elektrischer Strom: In der einen Leitung von der Quelle zum Empfänger und in der anderen vom Empfänger zurück zur Quelle. Zwischen den beiden Leitungen herrscht eine elektrische Spannung, d. h. die Leitungen befinden sich auf unterschiedlichem Potenzial.

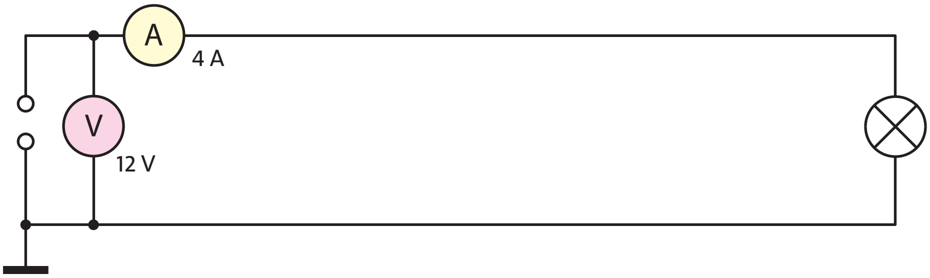
Die Stärke des Energiestroms von der Quelle zum Empfänger hängt mit der Stärke des elektrischen Stroms in den Leitungen und mit der Spannung zwischen den Leitungen zusammen. Und es ist nicht schwer, diesen Zusammenhang herzuleiten.

Wir vergleichen die Anordnungen der Abb. 17.1a und Abb. 17.1b. Beide Bilder zeigen ein Quelle-Empfänger-Paar: jeweils links ein Netzgerät, das auf 12 V eingestellt ist, und rechts eine 12-V-Lampe bzw. zwei 12-V-Lampen. Da die Lampen völlig gleichartig sind, fließt in der zweiten Anordnung ein doppelt so starker Energiestrom wie in der ersten; denn zwei Lampen verbrauchen doppelt so viel Energie wie eine einzige Lampe. Wie steht es nun in den beiden Fällen mit Spannung und elektrischer Stromstärke?

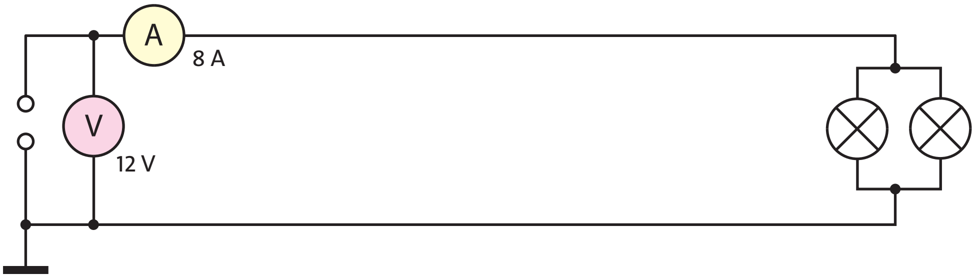
Die Spannungen sind in den beiden Fällen dieselben, beide Voltmeter zeigen 12 V an.

Und die elektrischen Stromstärken? Das Amperemeter in Abb. 17.1a zeigt 4 A an. Das bedeutet, dass durch eine Lampe, an der eine Spannung von 12 V liegt, ein elektrischer Strom von 4 A fließt. In Abb. 17.1b haben wir zwei Lampen, und an jeder von ihnen liegen 12 V. Durch jede von ihnen fließen daher auch 4 A. Mit der Knotenregel ergibt sich daraus, dass in jeder der langen Leitungen zwischen Quelle und Empfänger 8 A fließen müssen.

Bei der zweiten Anordnung sind also sowohl die Energiestromstärke zwischen Quelle und Empfänger als auch die elektrische Stromstärke in den Leitungen doppelt so groß wie in der ersten. Hätten wir statt der zwei Lampen drei oder vier genommen, so wären sowohl P als auch I dreimal bzw. viermal so groß gewesen. Wir fassen dieses Ergebnis zusammen: Bei einem elektrischen Energietransport sind — bei konstanter a)



b)



c)

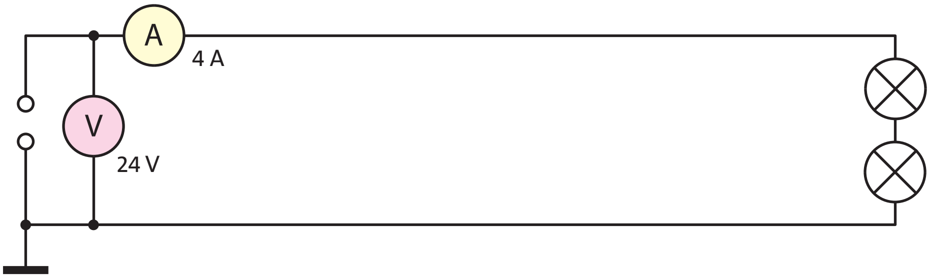


Abb. 17.1 Die Energiestromstärke ist proportional zur elektrischen Stromstärke, falls die Spannung konstant ist, vergleiche (a) mit (b). Die Energiestromstärke ist proportional zur Spannung, falls die elektrische Stromstärke konstant ist, vergleiche (a) mit (c).

Spannung — Energiestromstärke und elektrische Stromstärke proportional zueinander; oder in Symbolen:

$$P \sim I \text{ für } U = \text{const.} \tag{17.1}$$

Wir haben damit die Hälfte des gesuchten Zusammenhanges. Wir müssen nun noch herausfinden, wie die Energiestromstärke von der Spannung zwischen den Leitungen abhängt. Zu diesem Zweck vergleichen wir Abb. 17.1a mit Abb. 17.1c. Auch in Abb. 17.1c sind zwei Lampen an das Netzgerät angeschlossen; diesmal aber nicht parallel zueinander, sondern hintereinander. Wir müssen zunächst dafür sorgen, dass beide Lampen leuchten, wie es sich gehört; wir müssen dafür sorgen, dass an jeder von ihnen eine Spannung von 12 V liegt. Dazu muss das Netzgerät auf 24 V hochgedreht werden. (Beachte die Potenzialwerte in Abb. 17.1c.) Da nun an jeder Lampe 12 V liegen, fließt auch durch jede Lampe ein elektrischer Strom von 4 A. Also: Das Voltmeter zeigt an, dass zwischen den Leitungen eine Spannung von 24 V herrscht, das Amperemeter zeigt an, dass in jeder der beiden Leitungen ein elektrischer Strom von 4 A fließt. Nun der Vergleich mit dem oberen Bild (Abb. 17.1a): Energiestromstärke und Spannung haben sich verdoppelt, die elektrische Stromstärke ist dieselbe. Wir schließen, dass bei konstanter elektrischer Stromstärke die Energiestromstärke zur Spannung proportional ist. In Symbolen:

$$P \sim U \text{ für } I = \text{const.} \tag{17.2}$$

Die Beziehungen (17.1) und (17.2) lassen sich zu einem einzigen Ausdruck zusammenfassen:

$$P \sim U \cdot I. \tag{17.3}$$

Dass die Beziehung (17.3) richtig ist, erkennt man daran, dass sie in $P \sim I$ übergeht, wenn man U konstant hält, und dass $P \sim U$ aus ihr wird, wenn man I festhält.

> Überträgt man Energie mit dem Energieträger Elektrizität, so ist die Energiestromstärke proportional zur Stärke des elektrischen Stroms in den Leitungen und zur Spannung zwischen den Leitungen.

Um die Beziehung (17.3) zu einer Gleichung zu machen, müssten wir eigentlich einen Proportionalitätsfaktor einführen, der bewirkt, dass die Maßeinheiten auf der rechten und der linken Seite übereinstimmen. Wir würden also schreiben:

$$P = k \cdot U \cdot I.$$

Glücklicherweise wurden aber die elektrischen Maßeinheiten so festgelegt, dass $k = 1$ ist. Man braucht also gar keinen Proportionalitätsfaktor, und es ist:

$$P = U \cdot I. \tag{17.4}$$

Man erhält die Energiestromstärke in Watt, wenn man die Spannung in Volt und die elektrische Stromstärke in Ampere einsetzt.

Aus Gleichung (17.4) folgt für die Maßeinheiten:

$$\mathrm{W} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{A}.$$

Gleichung (17.4) ist eine der wichtigsten Formeln der Elektrizitätslehre. Wenn man die Werte von zwei der drei Größen P, U und I kennt, kann man mit ihr den Wert der dritten berechnen.

Beispiel

Die Haussicherung unterbricht den elektrischen Strom, sobald dessen Stärke 16 A überschreitet. Wie viel Energie kann man pro Sekunde maximal aus den Steckdosen entnehmen?

Mit I = 16 A und U = 230 V ergibt sich nach Formel (17.4)

$$P = 230\ \mathrm{V} \cdot 16\ \mathrm{A} = 3680\ \mathrm{W}.$$

Zwei Heizlüfter, die je 2000 W verbrauchen, bringen also die Sicherung zum Abschalten.

Wir können nun auch verstehen, was die Angaben, die auf ein elektrisches Gerät aufgedruckt sind, bedeuten. Auf der Glühlampe von Abb. 17.2 steht „220 V/75 W“.

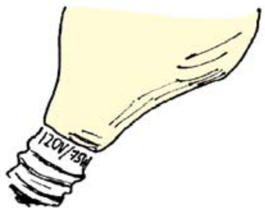


Abb. 17.2 Was bedeutet der Aufdruck „220 V/75 W“?

Zunächst zu der Angabe „220 V“: Bedeutet sie, dass die Glühlampe eine Spannung von 220 V erzeugt? Sicher nicht. Genau genommen stellt die Angabe nur eine Empfehlung dar. Es wird empfohlen, die Lampe mit einer Spannung von 220 V zu betreiben. Es kann uns natürlich niemand daran hindern, die Lampe an eine Quelle mit einer geringeren Spannung anzuschließen. Allerdings ist dann das Licht, das die Lampe abgibt, nicht mehr weiß, sondern mehr oder weniger rötlich. Und wir können die Lampe auch an eine Quelle mit einer höheren Spannung anschließen. Dann wird ihre Lebensdauer geringer sein.

Und was bedeutet der Aufdruck „75 W“? Dass über das Kabel ein Energiestrom von 75 W in die Lampe hineinfließt — falls man sie mit der empfohlenen Spannung betreibt. Bei einer höheren Spannung wird der Energiestrom stärker, bei niedrigerer Spannung wird er schwächer.

Gleichung (17.4) sagt uns auch, wie man die Stärke des Energiestroms messen kann, der mit einem zweiadrigen Kabel fortgeleitet wird (falls der Energieträger die Elektrizität ist): Man misst die elektrische Stromstärke in einer der Leitungen des Kabels (sie ist gleich der elektrischen Stromstärke in der anderen Leitung), und man misst die Spannung zwischen den Leitungen. Das Produkt aus den beiden Messwerten ist die Energiestromstärke.

Es gibt auch Messgeräte, die die Stärke des Energiestroms direkt messen, die Wattmeter. Ein Wattmeter hat einen Eingang und einen Ausgang für ein zweiadriges Kabel. Die Messung geschieht wie bei anderen Stromstärkemessungen auch: Durchtrennen des (zweiadrigen) Kabels und Verbinden der neu entstandenen Enden mit Eingang bzw. Ausgang des Messgeräts, Abb. 17.3.

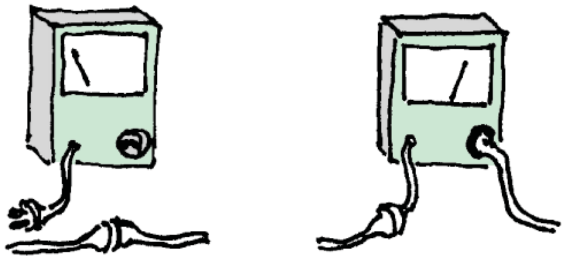


Abb. 17.3 Zur Messung der Energiestromstärke in einem zweiadrigen Kabel

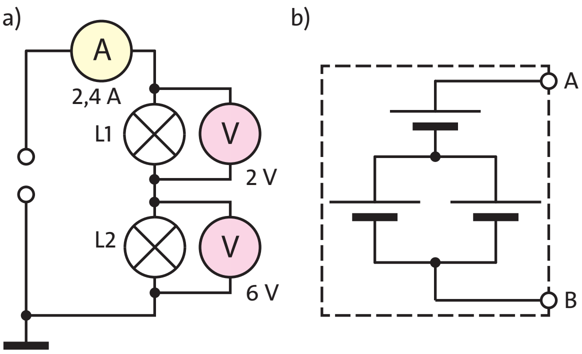


Abb. 17.4 (a) Zu Aufgabe 3; (b) zu Aufgabe 6

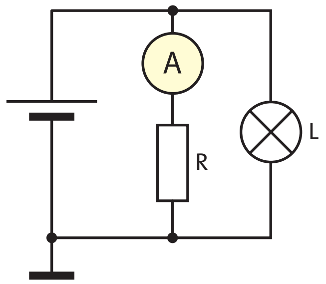


Abb. 17.5 Zu Aufgabe 10

Aufgaben

1. Eine Autoscheinwerferlampe ist an die 12-V-Batterie des Autos angeschlossen. Es fließt ein elektrischer Strom von 3,75 A. Wie stark ist der Energiestrom, der von der Batterie zur Lampe fließt?
2. Auf einer Autoblinkerlampe steht „12 V/21 W". Wie stark ist der elektrische Strom, wenn die Lampe leuchtet?
3. Abb. 17.4a zeigt zwei Lampen, die an ein Netzgerät angeschlossen sind. Berechne aus den Werten, die die drei Messinstrumente anzeigen
   (a) die Stärke des Energiestroms, der aus der Energiequelle herauskommt;
   (b) die Stärke des Energiestroms, der zu Lampe L_1 fließt;
   (c) die Stärke des Energiestroms, der zu Lampe L_2 fließt.
4. Zwei parallel geschaltete Motoren werden von einer 12-V-Batterie versorgt. Durch Motor 1 fließt ein elektrischer Strom von 2 A, durch Motor 2 fließt ein Strom von 3 A.
   (a) Wie viel Energie gibt die Batterie pro Sekunde ab?
   (b) Wie stark ist der Energiestrom, der in Motor 1 hineinfließt, und wie stark ist der, der in Motor 2 hineinfließt?
5. Eine 12-V-Batterie und eine 9-V-Batterie werden hintereinander geschaltet. Ein Elektromotor wird angeschlossen. Es fließt ein elektrischer Strom von 1,5 A. Wie stark ist der Energiestrom, der zum Motor fließt? Wie viel J gibt die 12-V-Batterie pro Sekunde ab, wie viel die 9-V-Batterie?
6. Drei Monozellen sind so zu einer Energiequelle zusammengebaut, wie es Abb. 17.4b zeigt. Welche Spannung liegt zwischen A und B? Mit den Anschlüssen A und B ist ein Energieverbraucher verbunden. Es fließt ein elektrischer Strom von 10 mA. Welche der drei Zellen wird zuerst leer? Wie viel Joule gibt die Quelle pro Sekunde ab? Wie viel geben die drei Monozellen einzeln pro Sekunde ab?
7. Ein Transistorradio hat als Energiequelle drei hintereinander geschaltete Monozellen. Wenn das Radio läuft, fließt im Durchschnitt ein elektrischer Strom von 60 mA. Jede Monozelle hat einen Energieinhalt von 20 kJ.
   (a) Wie stark ist der Energiestrom, der aus den Batterien fließt?
   (b) Wie lange läuft das Radio mit einem Satz Batterien?
8. Stelle den Energieverbrauch der verschiedensten elektrischen Geräte in eurem Haus in einer Liste zusammen. Bei welchen Geräten ist das Energiesparen besonders lohnend?
9. An ein 80-V-Netzgerät ist ein 2-kΩ-Widerstand angeschlossen. Wie stark ist der elektrische Strom, der durch den Widerstand fließt? Wie stark ist der Energiestrom, der zum Widerstand fließt?
10. Der Widerstand R in Abb. 17.5 hat einen Wert von 2 Ω. Das Amperemeter zeigt 10 A an. In das Lämpchen L fließt ein Energiestrom von 100 W.
    (a) Wie groß ist die von der Batterie erzeugte Spannung?
    (b) Wie stark ist der elektrische Strom, der durch das Lämpchen fließt?
    (c) Wie stark ist der elektrische Strom, der durch die Batterie fließt?

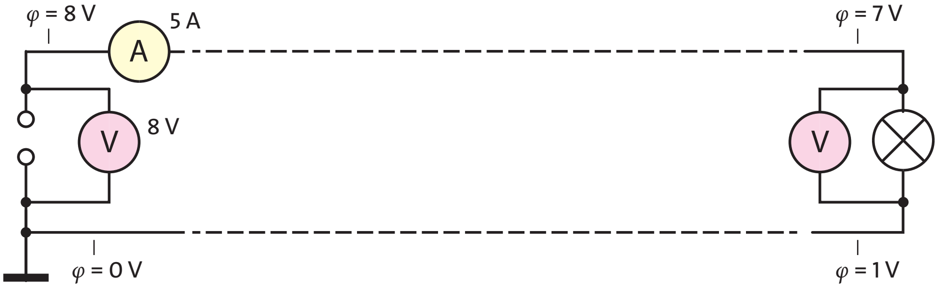


Abb. 17.6 Die Spannung an der Lampe ist niedriger als am Netzgerät. Zwei Volt werden gebraucht, um die Elektrizität durch die langen Leitungen zu drücken.

17.2 Der Leitungswiderstand – Energieverlust in Leitungen

Eine 6-V-Lampe ist über ein sehr langes Kabel an ein Netzgerät angeschlossen, Abb. 17.6. Die Spannung am Netzgerät ist zunächst auf 0 V eingestellt. Wir drehen nun die Spannung so lange hoch, bis das Voltmeter bei der Lampe 6 V anzeigt. Die Spannung hat jetzt den richtigen Wert, die Lampe leuchtet so wie sie leuchten soll. Das Amperemeter zeigt an, dass 5 A fließen. Da es sich um einen einfachen, unverzweigten Stromkreis handelt, muss die Stromstärke an allen Stellen des Stromkreises dieselbe sein.

Eine Sache ist aber merkwürdig. Das linke Voltmeter, das die Spannung zwischen den Anschlüssen des Netzgeräts anzeigt, steht auf 8 V und nicht auf 6 V, wie man es doch eigentlich hätte erwarten können. Wie kann das sein? Wir hatten bisher immer angenommen, dass alle Stellen eines Drahtes auf ein und demselben elektrischen Potenzial liegen. Diese Annahme ist hier offensichtlich verletzt. Denn wäre das Potenzial jedes der beiden langen Drähte links und rechts dasselbe, so müsste auch die Potenzialdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Draht links und rechts dieselbe sein.

Nachdem wir im vorigen Kapitel etwas über den Widerstand von Drähten erfahren haben, können wir diese Merkwürdigkeit aber erklären: Der Strom von 5 A, der an jeder Stelle des Stromkreises fließt, braucht nicht nur einen Antrieb, um den Widerstand der Lampe zu überwinden; er braucht auch einen Antrieb, um durch die Leitungsdrähte hindurchzukommen. Die beiden Leitungen und die Lampe müssen sich die 8 V, die das Netzgerät liefert, teilen. Die Lampe braucht, wie wir wissen, eine Potenzialdifferenz von 6 V. Es bleiben daher noch 2 V dafür übrig, die Elektrizität durch die Zuleitungen hindurchzudrücken. Da Hin- und Rückleitung aus gleichen Drähten bestehen, wird für jede der beiden Leitungen derselbe Antrieb gebraucht. In jeder der beiden Leitungen wird der elektrische Strom also durch eine Spannung von 1 V angetrieben. Zwischen Anfang und Ende jeder der beiden Leitungen liegt eine Potenzialdifferenz von 1 V. In Abb. 17.6 sind die Potenzialwerte an vier verschiedenen Stellen des Stromkreises angegeben.

Leitungswiderstände sind unerwünscht. Warum? Sie sind die Ursache von Energieverlusten; sie kosten damit Geld.

Wir wollen den Energieverlust des Stromkreises von Abb. 17.6 berechnen. Wir können den Stromkreis auffassen als drei hintereinander geschaltete Energieempfänger. Abb. 17.7 zeigt das sogenannte Ersatzschaltbild. Hin- und Rückleitung sind durch je einen Widerstand ersetzt: R_h

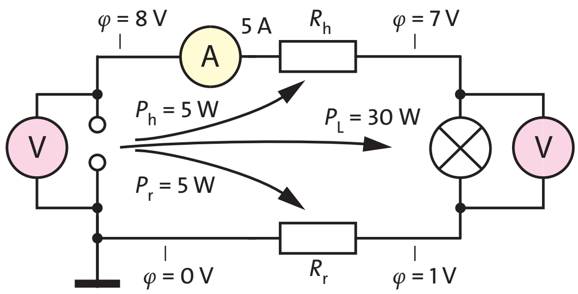


Abb. 17.7 Ersatzschaltbild des Stromkreises von Abb. 17.6. Die Leitungen wurden durch Widerstandssymbole ersetzt.

und R_r. Dafür dürfen wir uns die in Abb. 17.7 gezeichneten Leitungen als widerstandslos vorstellen; die Leitungswiderstände sind ja durch R_h und R_r. schon berücksichtigt. Die Potenziale der einzelnen Leitungsabschnitte sind in der Abbildung angegeben.

Zu jedem der drei „Geräte“ (die Lampe, der Widerstand R_h und der Widerstand R_r) fließt nun ein Energiestrom. Wir berechnen die drei Stromstärken P_L, P_h und P_r nach der Gleichung $P = U \cdot I$.

Die elektrische Stromstärke ist für alle drei Bauelemente dieselbe, nämlich 5 A. Die Spannung zwischen den Enden der Hinleitung ist

$$U_h = 8\text{ V} - 7\text{ V} = 1\text{ V},$$

die zwischen den Enden der Rückleitung ist

$$U_r = 1\text{ V} - 0\text{ V} = 1\text{ V}$$

und die Spannung zwischen den Anschlüssen der Lampe ist

$$U_L = 7\text{ V} - 1\text{ V} = 6\text{ V}.$$

Damit ergeben sich die drei Energiestromstärken

$$P_h = 1\text{ V} \cdot 5\text{ A} = 5\text{ W}$$
$$P_r = 1\text{ V} \cdot 5\text{ A} = 5\text{ W}$$
$$P_L = 6\text{ V} \cdot 5\text{ A} = 30\text{ W}.$$

Die 5 W + 5 W = 10 W, die in die Widerstände R_h und R_r, d. h. in die Zuleitungen fließen, bewirken, dass die Zuleitungen warm werden. Diese 10 W sind für uns verloren. Sie stellen den Verlustenergiestrom P_V dar. Es ist also

$$P_V = 10\text{ W}.$$

Man kann übrigens mit der Gleichung

$$R = U/I$$

auch leicht den Widerstand der Leitungen berechnen. Mit

$$U_h = U_r = 1\text{ V}$$

und

$$I = 5\text{ A}$$

ergibt sich

$$R_h = R_r = 0{,}2\ \Omega.$$

Jeder der beiden Drähte hat einen Widerstand von 0,2 Ω.

Aufgaben

1. Ein großer Motor ist über ein langes Kabel an eine 200-V-Quelle angeschlossen. Jede der beiden Leitungen des Kabels hat einen Widerstand von 0,5 Ω. In den Leitungen fließt ein elektrischer Strom von 8 A.
(a) Wie stark ist der Energiestrom, der die Quelle verlässt?
(b) Wie groß ist der Leitungsverlust?
(c) Wie viel Joule kommen pro Sekunde beim Motor an?

2. Abb. 17.8 zeigt zwei Anordnungen, bei denen eine Lampe über ein langes Kabel Energie von einem Netzgerät bekommt. Beides sind 60-W-Lampen. Die Lampe von Abb. 17.8a braucht eine Versorgungsspannung von 12 V. Es fließt daher ein elektrischer Strom von 5 A. Die Lampe von Abb. 17.8b braucht 24 V. Daher fließt hier ein Strom von 2,5 A. Jede Leitung hat einen Widerstand von 1 Ω. Berechne für beide Anordnungen
- die Spannung, die zwischen Anfang und Ende einer Leitung liegt;
- die Spannung an den Anschlüssen des Netzgeräts;
- den Energieverlust. Vergleiche die Verluste der beiden Anordnungen. Formuliere eine Regel.

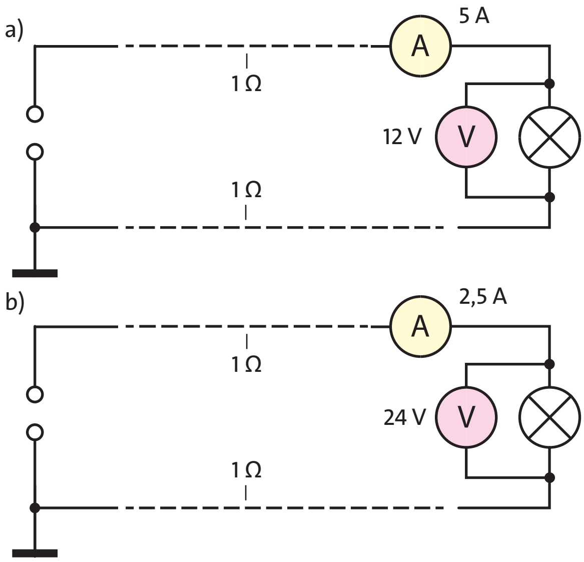


Abb. 17.8 In beiden Fällen kommt gleich viel Energie bei der Lampe an. Die Verluste sind aber verschieden.

18 DAS MAGNETISCHE FELD

18.1 Einige einfache Experimente mit Magneten

Magneten können sich anziehen und abstoßen. Die Anziehung bzw. Abstoßung geht von den sogenannten Polen aus.

Hängt man einen stabförmigen Magneten, dessen Pole sich an seinen Enden befinden, waagrecht an einen dünnen Faden, sodass sich der Magnet leicht drehen kann, so orientiert er sich in Nord- Süd-Richtung. Der eine Pol weist nach Norden, der andere nach Süden. Es muss also zweierlei Arten von Polen geben. Den Pol, der in unserem Experiment nach Norden weist, nennt man Nordpol, den anderen Südpol.

Die meisten Magneten haben einen Nordpol und einen Südpol. Manche haben aber auch mehr Pole, z. B. zwei Nord- und zwei Südpole. Magneten mit nur einem einzigen Pol, z. B. einem Nordpol, gibt es nicht. Abb. 18.1 zeigt drei verschiedene Magneten.

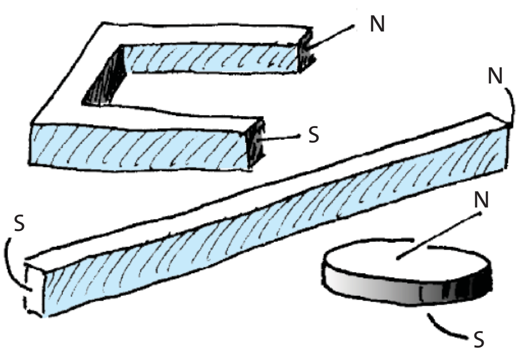


Abb. 18.1 Hufeisenmagnet, Stabmagnet und Scheibenmagnet

Anziehung findet zwischen zwei Magnetpolen nur statt, wenn der eine ein Nord- und der andere ein Südpol ist. Abstoßung beobachtet man zwischen zwei „gleichnamigen“ Polen, also zwischen zwei Nordpolen oder zwischen zwei Südpolen, Abb. 18.2. Die Anziehung oder Abstoßung ist umso stärker, je näher die beiden Pole beieinander sind.

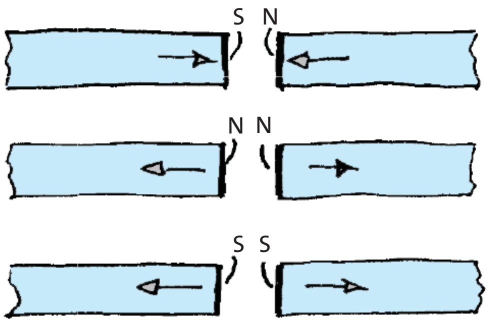


Abb. 18.2 Ungleichnamige Pole ziehen sich an, gleichnamige Pole stoßen sich ab.

> Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Die bisher gemachten Feststellungen beziehen sich nur darauf, wie ein Magnet auf einen anderen reagiert. Nun gibt es noch eine Erscheinung, die mit der gerade diskutierten eng verwandt ist, sich aber doch in einem wesentlichen Punkt unterscheidet, Abb. 18.3: Ein Magnet zieht Gegenstände aus Eisen an, zum Beispiel Nägel oder Büroklammern.

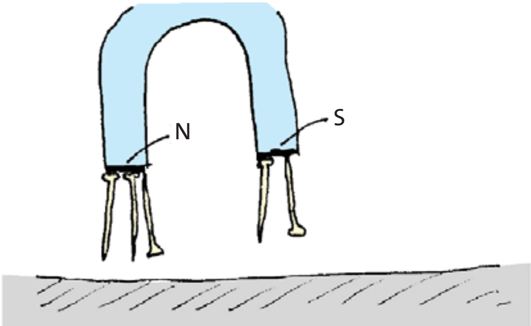


Abb. 18.3 Gegenstände aus „Weicheisen“ werden von einem Magneten immer angezogen und nie abgestoßen.

Er zieht diese Gegenstände immer an, er stößt sie nie ab. Dieses Verhalten steht nicht im Widerspruch zu unserer Regel, ja es lässt sich sogar mit ihr erklären. Auch dass ein Nagel von einem Magneten angezogen wird, liegt daran, dass sich ungleichnamige Pole anziehen: Der Nagel wird nämlich, sobald er in die Nähe eines Magnetpols kommt, selbst zum Magneten. Bringt man einen Nagel in die Nähe des Nordpols eines Magneten, Abb. 18.4a, so entsteht im Nagel auf der Seite, die dem Nordpol des Magneten zugewandt ist, ein Südpol. In Abb. 18.4a entsteht der Südpol also am Nagelkopf. Am anderen Ende des Nagels entsteht ein Nordpol. Es ist klar, dass der Nagel nun zum Nordpol des Magneten hingezogen wird.

Dreht man den Nagel um, Abb. 18.4b, so entsteht der neue Südpol wieder auf der dem Nordpol des Magneten zugewandten Seite, also an der Nagelspitze, während der Nagelkopf zum Nordpol wird.

Entfernt man den Nagel wieder vom Magneten, so verschwinden seine Pole wieder.

Man versteht nun auch die Erscheinung von Abb. 18.5. Der zweite Nagel hängt an dem neu entstandenen Nordpol an der Spitze des ersten Nagels.

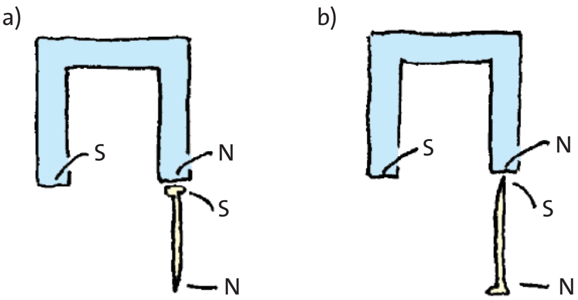


Abb. 18.4 An dem Ende des Nagels, das dem Nordpol des Magneten am nächsten ist, entsteht ein Südpol.

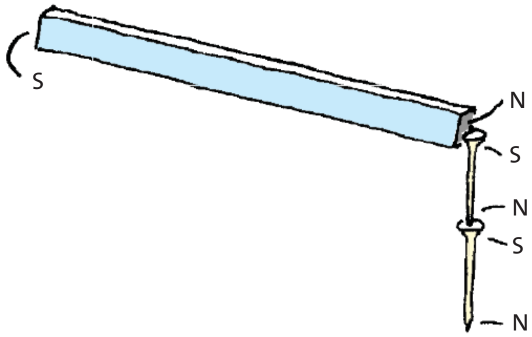


Abb. 18.5 Der untere Nagel hängt mit seinem Südpol am Nordpol des oberen Nagels.

Um zu betonen, dass ein „richtiger“ Magnet seine Pole nicht so leicht verliert wie ein Nagel, nennt man ihn auch einen Dauermagneten. Der Nagel ist kein Dauermagnet.

Das Erzeugen von magnetischen Polen an einem Gegenstand nennt man magnetisieren. Als wir den Nagel in die Nähe des Dauermagneten gebracht haben, haben wir ihn magnetisiert. Der Dauermagnet wurde schon vom Hersteller magnetisiert.

Materialien wie das Eisen, aus dem der Nagel besteht, nennt man weichmagnetisch. Weichmagnetische Stoffe werden magnetisiert, sobald sie in die Nähe eines Magneten kommen. Sie lassen sich sehr leicht magnetisieren. Sie verlieren aber ihren Magnetismus auch wieder, sobald man sie von dem Magneten entfernt.

Das Material, aus dem man Dauermagneten macht, nennt man hartmagnetisch.

Auch hartmagnetische Stoffe können ihren Magnetismus wieder verlieren. Man braucht nur etwas „Gewalt“ anzuwenden. Erhitzt man einen Dauermagneten auf eine Temperatur von etwa 800 °C, so verliert er seinen Magnetismus. Die Magnetpole verschwinden und kommen auch nicht wieder, wenn man den Magneten wieder abkühlt. Versuch es selbst, falls du einen Magneten hast, von dem du dich trennen kannst.

Ein typischer weichmagnetischer Stoff ist das „Weicheisen". Es ist die Eisensorte, aus der man z. B. Nägel macht. Hartmagnetische Stoffe haben eine kompliziertere Zusammensetzung. Auch sie enthalten aber meist Eisen.

Es gibt auch Stoffe, die mit ihren Eigenschaften zwischen diesen beiden Extremfällen liegen. Hierzu gehört der Stahl. Auch ein Stück Stahl bekommt Magnetpole, wenn man es in die Nähe eines anderen Magneten bringt. Entfernt man es dann wieder, so werden seine Pole schwächer, verschwinden aber nicht ganz.

Man kann also Stahl dauerhaft magnetisieren, d. h. zum Magneten machen. Du kannst es selbst versuchen, zum Beispiel mit einer Stahlstricknadel. Das Magnetisieren ist besonders wirkungsvoll, wenn du mit einem Pol eines starken Magneten mehrere Male immer in dieselbe Richtung über die Stricknadel streichst.

Man benutzt diesen Effekt zum Speichern von Daten, z. B. auf der Festplatte des Computer oder auf Kreditkarten. Auf dem Träger, d. h. der Festplatte oder dem Magnetstreifen der Kreditkarte, befindet sich eine sehr dünne Schicht aus einem Material, das sich leicht magnetisieren lässt, und das seinen Magnetismus behält. Die Daten werden dadurch gespeichert, dass man auf die Schicht des Trägers entlang einer Linie ein bestimmtes Muster magnetisiert.

Aufgabe

1. Jemand behauptet, es gebe nicht zwei, sondern vier verschiedene Arten von Magnetpolen. Er gibt dir zwei Magneten: einen normalen mit einem Nord- und einem Südpol, und einen anderen, der angeblich einen A- und einen B-Pol haben soll. Was für Experimente kannst du machen, um ihm zu beweisen, dass seine Behauptung falsch ist?

18.2 Magnetpole

Unsere bisherigen Aussagen über Magnetpole waren in mancher Beziehung noch etwas vage. Wo genau sitzen eigentlich die Pole bei einem Magneten? Wo fangen sie an, wo hören sie auf?

Wir machen ein sehr einfaches Experiment mit zwei kräftigen, völlig gleichartigen Hufeisenmagneten. Zunächst heben wir mit einem der beiden Magneten einen schweren Eisenblock, Abb. 18.6.

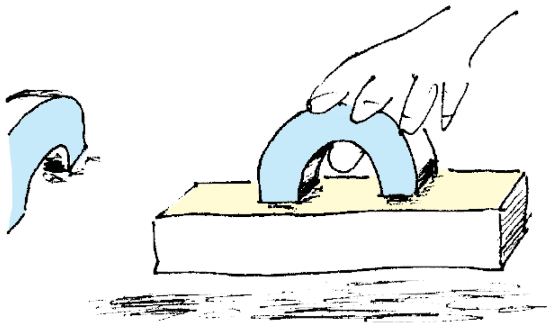


Abb. 18.6 Der Eisenblock kann mit einem einzigen der beiden Hufeisenmagneten hochgehoben werden.

Wir bringen nun die Magneten so zusammen, dass der Nordpol des einen am Südpol des anderen hängt und der Südpol des einen am Nordpol des anderen, Abb. 18.7. Wir versuchen nun, mit diesem ringförmigen Gebilde unseren Eisenblock hochzuheben. Es geht aber nicht, der Block bleibt nicht hängen. Die Wirkung der Pole ist also verschwunden. Wir können auch sagen, die Pole sind verschwunden, sie haben sich gegenseitig „aufgehoben".

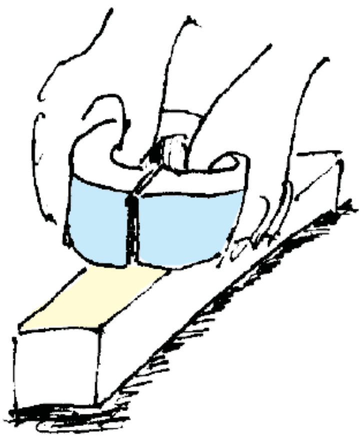


Abb. 18.7 Die Hufeisenmagneten bilden einen Ring. Der Eisenblock bleibt an diesem Ring nicht hängen.

Wir wollen diese Beobachtung noch etwas genauer beschreiben. Bei einem Magneten sitzt an den

Polen etwas, das wir magnetische Ladung nennen wollen. Diese magnetische Ladung befindet sich an der Oberfläche des Magneten, im Fall der Hufeisenmagneten von Abb. 18.6 an den beiden Endflächen.

Aus der Tatsache, dass sich Nord- und Südpolladung gegenseitig aufheben, kann man schließen, dass die magnetische Ladung mit zweierlei Vorzeichen auftritt. Welche der beiden, Nord- oder Südladung, man als positiv und welche als negativ bezeichnet, ist egal. Man muss sich nur ein für alle Mal festlegen. Man hat nun willkürlich die Nordpolladung als positiv und die Südpolladung als negativ definiert.

Bringt man gleich viel positive und negative magnetische Ladung zusammen, so entsteht insgesamt die Polladung null, die positive und die negative magnetische Ladung heben sich gegenseitig auf. (Es ist so, als hättest du gleichzeitig 100 € Schulden und 100 € Guthaben. Dein gesamter Geldbesitz wäre dann 0 €.)

Das Experiment von Abb. 18.7 lässt sich nun leicht deuten: An jeder der beiden Berührungsstellen der Magneten wurde gleich viel positive und negative magnetische Ladung zusammengebracht. Wir können aus diesem Experiment noch eine andere, sehr einfache Schlussfolgerung ziehen: Ein einziger Magnet enthält genauso viel positive wie negative magnetische Ladung.

> Ein Magnet enthält genauso viel positive wie negative magnetische Ladung.

Dieser Satz gilt für jeden Magneten, zum Beispiel auch für den unsymmetrischen in Abb. 18.8a.

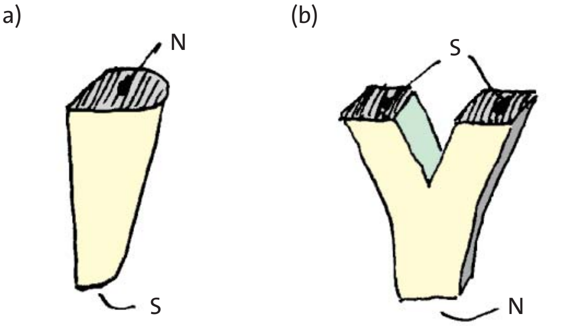


Abb. 18.8 Auch für jeden dieser ungewöhnlichen Magneten ist die Nordpolladung gleich der Südpolladung.

Die magnetische Ladung sitzt hier an den beiden Endflächen. Da der Nordpol aber eine größere Fläche einnimmt als der Südpol, muss die Ladung auf der Südpolseite stärker konzentriert sein als auf der Nordpolseite. Abb. 18.8b zeigt einen anderen, etwas ungewöhnlichen Magneten: Er hat einen Nordpol, aber zwei Südpole. Wieder ist aber die Nordpolladung gleich der gesamten Südpolladung.

18.3 Magnetisierungslinien

Es fällt uns nun nicht mehr schwer, eine andere bekannte Erscheinung zu erklären. Bricht man einen Stabmagneten durch, so entstehen zwei neue Magnetpole, Abb. 18.9. Dieses Durchbrechen kann man wiederholen, d. h. die Bruchstücke wieder durchbrechen, so oft man will: Man erhält immer wieder komplette Magneten, und jedes Teilstück hat genauso viel Nordpolladung wie Südpolladung.

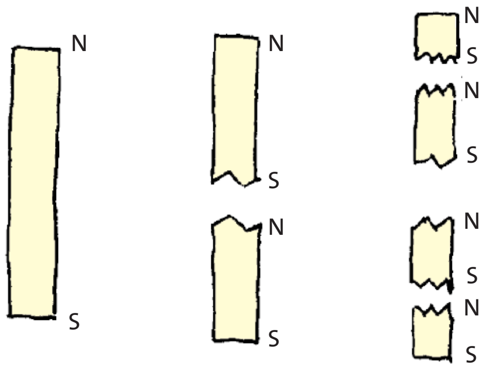


Abb. 18.9 Bricht man einen Stabmagneten durch, so entstehen an der Bruchstelle zwei neue Pole.

Bricht man ein nicht magnetisiertes Stück Stahl durch, so sitzen an der Bruchstelle keine Polladungen. Bricht man dagegen ein magnetisiertes Stück Stahl durch, so erhält man Pole. Wir schließen daraus, dass beim Magnetisieren eines Stücks Eisen das ganze Eisenstück verändert wird und nicht nur die Stellen, wo sich die Pole befinden.

Wie jeder andere Stoff, so besteht auch das Eisen aus sehr, sehr kleinen Teilchen, den Atomen. Beim Eisen ist nun jedes Atom selbst magnetisch, d. h. jedes Atom ist ein winzig kleiner Magnet.

Magnetisierungslinien

Solange das Eisen nicht magnetisiert ist, sind aber die atomaren Magnetchen ganz unregelmäßig orientiert. Das hat zur Folge, dass das Eisenstück als Ganzes keine Magnetisierung zeigt, Abb. 18.10a. Die Wirkungen der Einzelmagnetchen heben sich gegenseitig auf.

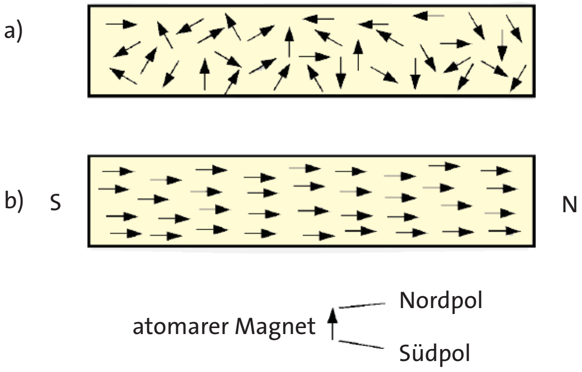


Abb. 18.10 (a) In einem unmagnetisierten Stück Eisen sind die Richtungen der atomaren Magnetchen ungeordnet. (b) In einem magnetisierten Stück Eisen sind die atomaren Magnetchen ausgerichtet. An der linken Stirnfläche des Magneten ist ein Südpol, an der rechten ein Nordpol entstanden.

In einem Dauermagneten oder einem magnetisierten Stück Weicheisen dagegen sind die atomaren Magneten regelmäßig ausgerichtet, wie etwa in Abb. 18.10b. Das hat zur Folge, dass an der linken Stirnfläche des Magneten Südpolladung (negative magnetische Ladung) sitzt, und an der rechten Nordpolladung (positive magnetische Ladung).

Abb. 18.10b zeigt auch, wie man den Magnetisierungszustand eines Gegenstandes grafisch darstellen kann. Man kann diese Darstellung aber noch etwas praktischer gestalten. Statt die atomaren Magnete durch viele einzelne Pfeile anzudeuten, zeichnet man durchgehende Linien, die Magnetisierungslinien. Man zeichnet sie so, dass ihre Richtung die Orientierung der atomaren Magneten angibt. Man versieht jede dieser Linien mit einem Pfeil, und zwar so, dass die Linie vom Süd- zum Nordpol läuft, Abb. 18.11a.

> Magnetisierungslinien beschreiben den Magnetisierungszustand von Materie. Sie beginnen an negativen magnetischen Ladungen (Südpolladungen) und enden an positiven magnetischen Ladungen (Nordpolladungen).

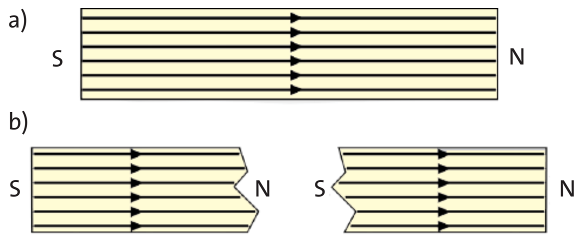


Abb. 18.11 (a) Ein ungewöhnlicher Magnet. (b) Dass die Magnetisierungslinien nur durch den oberen Schenkel verlaufen, ist von außen nicht zu erkennen. (c) Beim Durchbrechen entstehen an den oberen Bruchstellen Pole, an den unteren nicht.

Das Magnetisierungslinienbild ist sehr aussagekräftig. Es sagt uns, an welchen Stellen bei einem Magneten die magnetische Ladung sitzt: Dort, wo Linien beginnen, sitzt negative, wo sie enden, positive magnetische Ladung. Es sagt uns auch, was passiert, wenn man einen Magneten durchbricht. Zerbricht man zum Beispiel den Magneten von Abb. 18.11a, so wie es Abb. 18.11b zeigt, so enden an der rechten Seite des linken Bruchstücks Magnetisierungslinien. Hier befindet sich daher ein neuer Nordpol. An der linken Seite des rechten Bruchstücks beginnen Magnetisierungslinien. Hier ist ein neuer Südpol entstanden.

Man kann ein Stück Eisen auf die verschiedensten Arten magnetisieren. Wir betrachten einen etwas ungewöhnlichen Magneten, Abb. 18.12a.

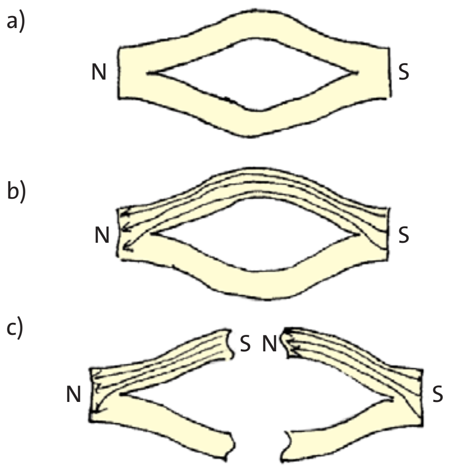


Abb. 18.12 (a) Ein ungewöhnlicher Magnet. (b) Dass die Magnetisierungslinien nur durch den oberen Schenkel verlaufen, ist von außen nicht zu erkennen. (c) Beim Durchbrechen entstehen an den oberen Bruchstellen Pole, an den unteren nicht.

Abb. 18.12b zeigt, wie er bei der Herstellung magnetisiert wurde. Das Magnetisierungslinienbild sagt uns, was passiert, wenn wir den Magneten durchbrechen. An den oberen Bruchstellen entstehen Pole, an den unteren nicht, Abb. 18.12c.

Du siehst, dass man aus den Magnetisierungslinien auf die Lage der Pole schließen kann. Lässt sich dieser Schluss auch umkehren? Kann man die Magnetisierungslinien zeichnen, wenn die Lage der Pole vorgegeben ist? Wir betrachten Abb. 18.13a.

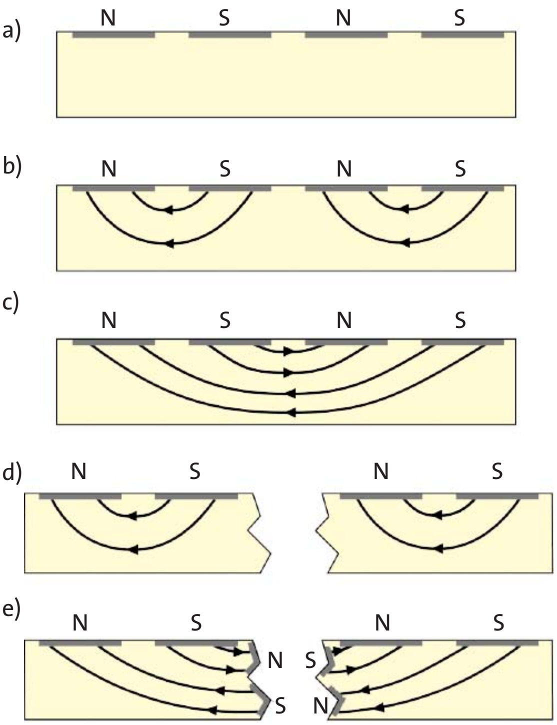


Abb. 18.13 (a) Ein Magnet mit 4 Polen an der Oberseite. (b) und (c): Es gibt mehrere Magnetisierungsmöglichkeiten. (d) und (e): Den Unterschied zwischen (b) und (c) bemerkt man, wenn man die Magneten in der Mitte durchbricht.

Der Magnet hat 4 Pole, alle auf einer Seite. Wie verlaufen die Magnetisierungslinien? Du siehst leicht, dass es mehrere Lösungen gibt: Magneten mit den in Abb. 18.13a dargestellten Polen kann man auf verschiedene Arten herstellen. Abb. 18.13b und Abb. 18.13c zeigen zwei Möglichkeiten. Wie die Magnetisierung tatsächlich ist, sieht man dem Magneten von außen nicht an. Eine Methode, zwischen den beiden Möglichkeiten zu unterscheiden, wäre es, den Magneten in der Mitte durchzubrechen. Beim Durchbrechen des Magneten von Abb. 18.13b entstehen keine neuen Pole, Abb. 18.13d. Wenn man dagegen den Magneten von Abb. 18.13c durchbricht, entsteht an der Bruchstelle auf jeder Seite ein Nord- und ein Südpol, Abb. 18.13e.

Aufgaben

1. Wie könnten die Magnetisierungslinien in einem Hufeisenmagneten verlaufen?
2. Wie könnten die Magnetisierungslinien in dem Magneten der Abb. 18.14a verlaufen?
3. Wie könnten die Magnetisierungslinien in dem Magneten der Abb. 18.14b verlaufen? Gib zwei Lösungen an.
4. Ein Magnet habe die Form eines zylindrischen Scheibchens. Der Magnet hat auf seiner Zylindermantelfläche drei Nord- und drei Südpole. Nord- und Südpole wechseln sich ab und sind gleichmäßig über den Zylinderumfang verteilt. Wie könnte die Magnetisierung des Zylinders sein? Gib zwei Lösungen an.
5. Jemand gibt dir einen Stahlring und behauptet, der Ring sei magnetisiert, und zwar so, dass die Magnetisierungslinien der Ringform folgen und im Kreis herumlaufen. Der Magnet hat also keine Pole. Wie kannst du feststellen, ob die Behauptung zutrifft?

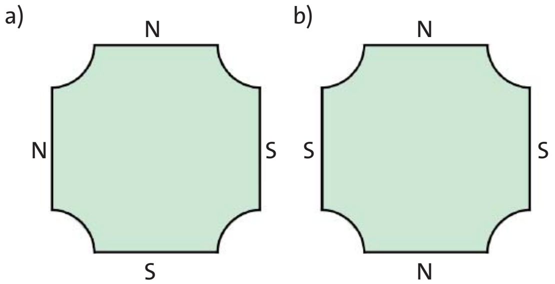


Abb. 18.14 Zu den Aufgaben 2 und 3. Wie verlaufen die Magnetisierungslinien?

18.4 Das magnetische Feld

Wir wenden uns für kurze Zeit einem ganz anderen Problem zu. Die beiden Wagen in Abb. 18.15a bewegen sich aufeinander zu, weil Willy an dem Seil zieht. Die Wagen in Abb. 18.15b werden durch eine Feder voneinander weggedrückt. Abb. 18.15c zeigt zwei Kolben in einem Zylinder. Jemand drückt auf den linken Kolben. Dadurch setzt sich der rechte Kolben in Bewegung.

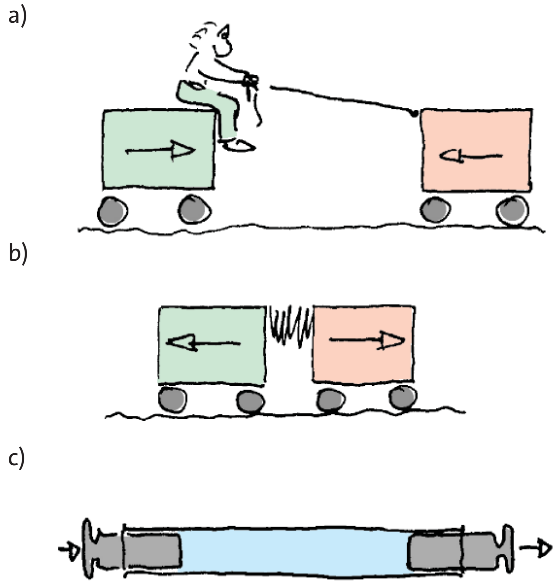


Abb. 18.15 Die beiden Wagen in (a) sind durch ein Seil miteinander verbunden, die Wagen in (b) durch eine Feder und die Kolben in (c) durch Luft.

Den drei Situationen von Abb. 18.15 ist etwas gemeinsam: Jedes Mal gerät ein Gegenstand auf Kosten eines anderen in Bewegung. (Ein Gegenstand bekommt vom anderen Impuls.)

Worauf es uns im Augenblick ankommt, ist die folgende Feststellung: Damit ein Gegenstand A auf einen Gegenstand B drücken oder an B ziehen kann, muss zwischen A und B eine Verbindung existieren. (Damit Impuls von A nach B oder von B nach A fließen kann, muss eine Verbindung existieren.)

Im ersten Beispiel von Abb. 18.15 ist die Verbindung das Seil, im zweiten ist es die Feder und im dritten die Luft im Zylinder. Wir wollen dieses fast selbstverständliche Ergebnis festhalten:

> Wenn ein Gegenstand einen anderen wegdrückt oder zu sich heranzieht, muss es eine Verbindung zwischen den Gegenständen geben.

Zurück zum Magnetismus: Auf zwei Wagen werden Magneten montiert, Abb. 18.16, und Wagen A wird auf Wagen B zubewegt. Noch bevor sich die Wagen oder die Magneten berühren, setzt sich B in Bewegung.

Selbstverständlich, wirst du sagen. Mit dieser Erscheinung haben wir uns ja ausführlich beschäftigt. Der linke Nordpol stößt den rechten Nordpol ab. Wenn wir nun aber unseren letzten Merksatz ernst nehmen, können wir eine neue Schlussfolgerung ziehen: Zwischen den beiden Nordpolen in Abb. 18.16 muss es eine Verbindung geben, eine Verbindung, über die der linke Nordpol am rechten schiebt. Diese Verbindung ist unsichtbar (wie übrigens auch die Luft in Abb. 18.15c). Man nennt das Gebilde, das die beiden Nordpole in Abb. 18.16 miteinander verbindet, ein magnetisches Feld.

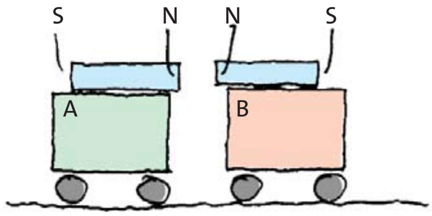


Abb. 18.16 Die beiden Magneten sind durch ihr magnetisches Feld miteinander verbunden.

Nimm zwei sehr starke Magneten, nähere gleichnamige Pole einander an, bewege sie aufeinander zu. Du spürst das Magnetfeld, das die Pole auseinanderzuhalten versucht.

Magnetisches Feld hängt an jedem der beiden Pole eines Magneten. Bringt man zwei Pole von zwei verschiedenen Magneten zusammen, so verhält sich das gesamte Feld zwischen den beiden Polen ähnlich wie eine elastische Feder.

Genauso wie eine Feder drücken und ziehen kann, so kann auch das Feld drücken und ziehen. Es gibt also nicht zwei verschiedene Sorten Feld. Wie es kommt, dass das magnetische Feld manchmal drückt und manchmal zieht, wirst du besser verstehen, nachdem du den nächsten Abschnitt gelesen hast.

Im Augenblick hilft uns das Feld schon, eine alte Regel genauer zu formulieren. Wir hatten früher gesagt: „Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an." Sieh dir noch einmal die Situation in Abb. 18.15b an. Würdest du hier sagen, die beiden Wagen stoßen sich ab? Sicher nicht. Es trifft die Sache besser, wenn man sagt: „Die Feder drückt die beiden Wagen voneinander weg." Entsprechend wollen wir nun auch unsere Regel über die Magneten besser formulieren:

> Gleichnamige Magnetpole werden von ihrem Feld voneinander weggedrückt, ungleichnamige werden zueinander hingezogen.

18.5 Die grafische Darstellung magnetischer Felder

Die Wirkung eines magnetischen Feldes, das an einem Pol hängt, wird nach außen hin, d.h. wenn man sich von dem Pol entfernt, schwächer. Das liegt daran, dass das Feld in Polnähe dichter ist. Seine Dichte nimmt nach außen hin ab, ähnlich wie die Dichte der Luft über der Erdoberfläche nach oben hin abnimmt. Wir können also nicht sagen, das Feld reiche vom Pol aus bis zu einem ganz bestimmten Abstand vom Pol. Das Feld hat keinen Rand, es hat keine scharfe Grenze — so wie die Luft über der Erde keine scharfe Grenze hat.

Wenn wir nun das magnetische Feld in einer Zeichnung darstellen wollen, können wir seine unterschiedliche Dichte dadurch zum Ausdruck bringen, dass wir das Feld in Polnähe dunkelgrau zeichnen und die Grautönung nach außen hin immer heller werden lassen, Abb. 18.17.

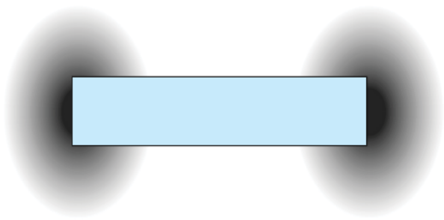


Abb. 18.17 Die Dichte des magnetischen Feldes wird durch unterschiedliche Grautönung zum Ausdruck gebracht.

Eine andere Methode besteht darin, dass man das Feld durch Punkte andeutet und die Punkte in Polnähe dichter zeichnet als weiter außen, Abb. 18.18.

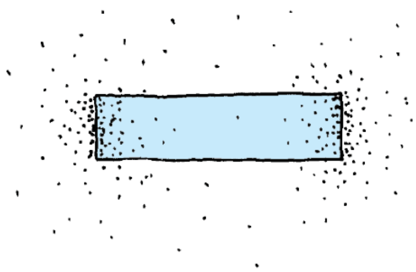


Abb. 18.18 Die Dichte des Magnetfeldes wird durch unterschiedliche Dichte der Punkte zum Ausdruck gebracht.

Die Darstellung lässt sich aber noch verbessern. Um das einzusehen, müssen wir noch einige Experimente machen. Wir stellen zunächst in die Nähe eines Magneten eine Kompassnadel, d.h. einen kleinen, drehbar gelagerten Magneten. Die Richtung, in die sich die Nadel einstellt, hängt nun davon ab, an welche Stelle wir sie stellen. Jeder Stelle des Feldes unseres großen Magneten entspricht eine bestimmte Richtung. Wir sagen auch: Das Feld des Magneten hat an jeder Stelle eine bestimmte Richtung.

Dass man jeder Stelle eines massiven Gegenstandes eine bestimmte Richtung zuordnen kann, ist nichts Ungewöhnliches. Dass Holz gemasert ist, bedeutet ja nichts anderes, als dass es an jeder Stelle eine Richtung gibt, in der es sich besonders leicht spalten lässt, Abb. 18.19. Wir haben im vorigen Abschnitt gesehen, dass es auch in Eisen ausgezeichnete Richtungen gibt, nämlich dann, wenn das Eisen magnetisiert ist.

Abb. 18.19 Die Maserung von Holz sagt uns, in welcher Richtung das Holz besonders leicht zu spalten ist.

Man kann die Richtungen der einzelnen Stellen eines magnetischen Feldes auf sehr einfache Art alle auf einmal sichtbar machen. Wir fragen zum Beispiel nach den Richtungen des Feldes eines Stabmagneten.

Man legt über den Magneten eine Platte aus einem nicht magnetisierbaren Material, am besten aus Glas. Das Feld wird durch diese Glasscheibe nicht verändert. Man streut nun auf diese Scheibe Eisenfeilspäne und klopft leicht gegen die Scheibe. Die Späne ordnen sich dabei zu Ketten an.

Diese Ketten zeigen an jeder Stelle des Feldes in die Richtung, in die auch eine Kompassnadel zeigen würde. Sie zeigen also die Richtung des Feldes an jedem Punkt an.

Nun zurück zu unserem Problem der graphischen Darstellung eines Feldes. Wir haben gesehen, dass jedes „Stückchen“ Feld eine bestimmte Richtung hat. Um diese Richtung in einer Zeichnung zum Ausdruck zu bringen, können wir so vorgehen wie es Abb. 18.20 zeigt: Statt der Punkte (in Abb. 18.8) zeichnen wir kleine Pfeile – wo das Feld dicht ist viele, wo es weniger dicht ist wenige. Die Pfeilspitze zeichnen wir an dasjenige Ende, das vom Nordpol des großen Magneten weg weist.

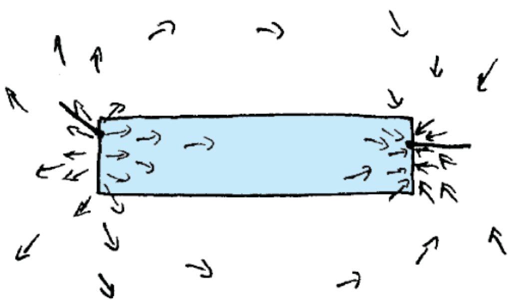


Abb. 18.20 Die Richtung der Pfeile stellt die Feldrichtung dar, ihre Dichte ist ein Maß für die Dichte des Feldes.

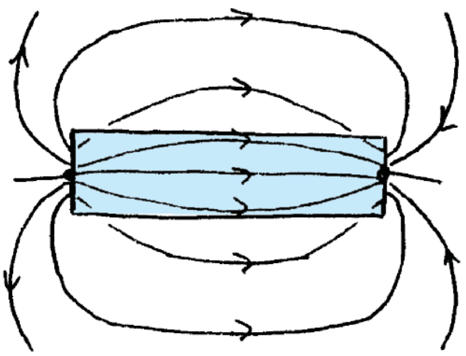


Abb. 18.21 Feldlinienbild. Je enger die Feldlinien sind, desto dichter ist das Feld.

Noch eleganter ist die Methode der Feldlinien, Abb. 18.21. Statt der Einzelpfeile von Abb. 18.20 zeichnet man durchgehende Linien. Die Richtung der Linien gibt die Feldrichtung an. Der seitliche Abstand zwischen den Linien sagt uns, wie dicht das Feld ist. Dort wo die Linien eng nebeneinander liegen, ist das Feld dicht, wo ihr Abstand groß ist, ist das Feld weniger dicht. Auch an die Feldlinien zeichnet man Pfeile, und zwar so, dass die Linien an einem Nordpol beginnen und an einem Südpol enden.

> Die magnetischen Feldlinien beginnen an positiven magnetischen Ladungen (Nordpol) und enden an negativen (Südpol).

Verwechsle die Feldlinien nicht mit den Magnetisierungslinien. Beide Linien sagen uns etwa über ausgezeichnete Richtungen. Während uns die Magnetisierungslinien Auskunft über den Zustand von magnetisiertem (sichtbarem) Eisen geben, beschreiben die Feldlinien den Zustand des (unsichtbaren) Feldes.

18.6 Magnetisierungslinien und Feldlinien

Wir haben gesehen, dass man sowohl den Magnetisierungszustand von Materie als auch das magnetische Feld grafisch darstellen kann. Wir wollen nun beide Verfahren in einer einzigen Abbildung verwenden. Wir erinnern uns dazu an die Regeln: Magnetisierungslinien beginnen am Südpol und enden am Nordpol, magnetische Feldlinien beginnen am Nordpol und enden am Südpol. Wir können diese Regeln zusammenfassen:

> Dort, wo Magnetisierungslinien enden, beginnen magnetischen Feldlinien, und umgekehrt.

Wenn man Magnetisierungs- und Feldlinien in einer einzigen Abbildung darstellt, benutzt man am besten verschiedene Farben.

Wir betrachten einen Magneten, der die Form eines Ringes hat, aus dem ein Stück herausgenommen wurde. Abb. 18.22a zeigt den Magneten mit seinen Polen. Wie könnten die Magnetisierungslinien verlaufen? Die einfachste Antwort gibt Abb. 18.22b. Wenn man nun das Feld mithilfe kleiner Kompassnadeln untersucht, bekommt man den Verlauf der Feldlinien, Abb. 18.22c.

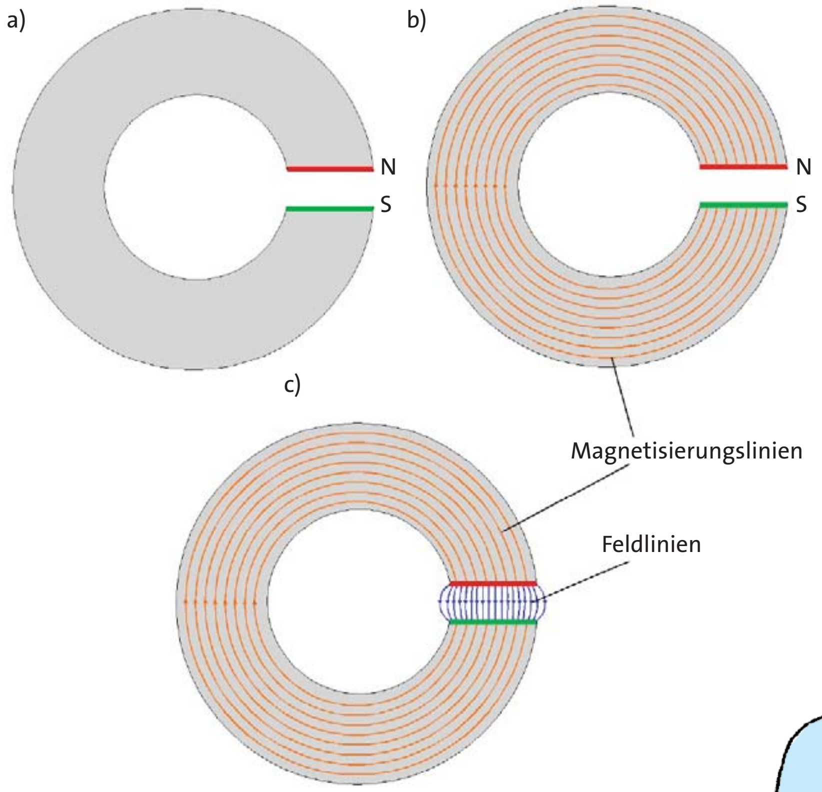


Abb. 18.22
(a) Ringmagnet mit Polen
(b) Ringmagnet mit Magnetisierungslinien
(c) Ringmagnet mit Magnetisierungslinien und Feldlinien

Aufgabe

1. Abb. 18.23 zeigt eine Anordnung aus einem Hufeisenmagneten und einem Stück Weicheisen. (a) An welchen Stellen des Weicheisens bilden sich Pole? Um was für Pole (positive oder negative) handelt es sich? (b) Wo befindet sich magnetisches Feld? Skizziere die Feldlinien. (c) Zeichne Magnetisierungslinien im Magneten und im Weicheisen ein.

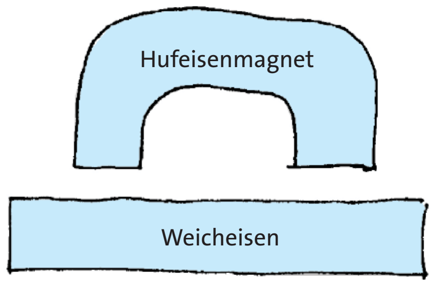


Abb. 18.23 Zur Aufgabe 1

18.7 Magnetisches Feld und Materie

Eine faszinierende Eigenschaft von Magneten haben wir noch nicht angesprochen. Magneten können durch andere Körper hindurch drücken oder ziehen. Wir wollen diese Erscheinung genauer untersuchen.

Ein Nagel wird an einem dünnen Faden aufgehängt und so in die Nähe eines starken Magneten gebracht, dass er zum Magneten hingezogen wird, ohne ihn zu berühren, Abb. 18.24. Wir führen nun in den Zwischenraum zwischen Nagel und Magnet Platten aus den verschiedensten Materialien ein.

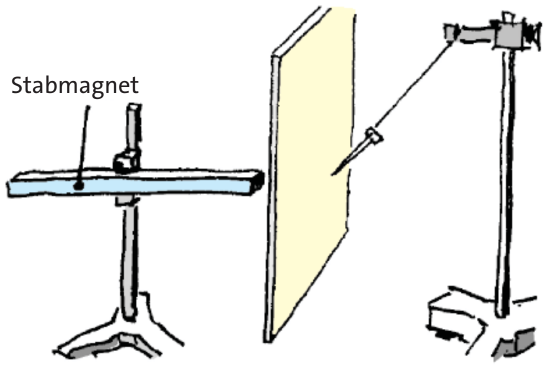


Abb. 18.24 In den Raum zwischen Magnetpol und Nagel werden Platten aus verschiedenen Materialien eingeführt.

In den meisten Fällen bleibt der Nagel in seiner ursprünglichen Lage hängen, er „merkt“ gar nichts von der Platte. Das ist der Fall für Platten aus Pappe, Holz, Glas, den verschiedensten Kunststoffen, aber auch den meisten Metallen wie Aluminium, Kupfer und Blei. Dies sind gerade diejenigen Materialien, die von einem Magneten nicht angezogen werden, die sich also nicht magnetisieren lassen.

Das magnetische Feld geht durch diese Stoffe einfach hindurch. Es dringt in sie ein, so als wären diese Stoffe nicht da. Wundert dich das? Kann es denn sein, dass sich an einer Stelle im Raum zweierlei Dinge befinden, nämlich Materie und Feld? Eigentlich ist diese Feststellung gar nicht so überraschend. Jeder kennt sehr gut ein anderes Beispiel dafür, dass zwei „Stoffe" an derselben Stelle sind: Wenn Licht durch Glas hindurchtritt, befinden sich an ein und derselben Stelle Licht und Glas. Genauso können sich auch z. B. Kupfer und Magnetfeld an ein und derselben Stelle befinden.

Ganz anders ist es nun, wenn wir in den Raum zwischen Magnet und Nagel (siehe Abb. 18.24) eine Platte aus einem weichmagnetischen Material, eine Eisenplatte zum Beispiel, einführen: Der Magnet lässt den Nagel los, der Nagel hängt nach unten.

Die Eisenplatte lässt also das magnetische Feld nicht durch. Diese Aussage können wir noch genauer formulieren. Zunächst aber noch ein Experiment. Wir schieben eine dünne Eisenplatte zwischen Magnet und Nagel. Der Nagel fällt nach unten. Wir schieben dann zwei dünne Eisenplatten ein, dann drei, vier usw. Selbstverständlich fällt der Nagel jedes Mal nach unten. Wir können nun aber die zwei, drei usw. dünnen Eisenplatten auch auffassen als eine einzige dicke, Abb. 18.25.

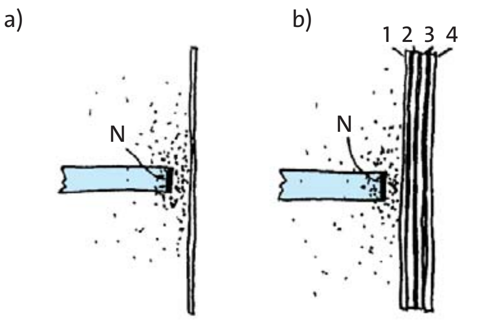


Abb. 18.25 Das Feld reicht durch die dünne Eisenplatte, (a), nicht hindurch. Demnach kann es auch in die Platten 2, 3 und 4 in (b) nicht eindringen.

Und von dieser dicken Platte können wir nicht nur sagen, dass das Feld auf der rechten Seite nicht mehr herauskommt, sondern auch, dass es in die Platte gar nicht eindringt — wenigstens nicht tiefer als es der ersten dünnen Platte entspricht. Wir haben damit wieder eine wichtige Entdeckung gemacht:

> Das magnetische Feld dringt in weichmagnetische Stoffe nicht ein.

Dass weichmagnetische Körper Pole bilden, wenn man sie in ein magnetisches Feld bringt, bedeutet, dass sie auf das magnetische Feld mit Magnetisierung reagieren.

Wir wollen untersuchen, an welcher Stelle die Pole im Fall unserer Platte entstehen. Man benutzt hierzu am besten eine „zweidimensionale" Anordnung, Abb. 18.26, sodass man das Feld mithilfe von Eisenfeilspänen sichtbar machen kann.

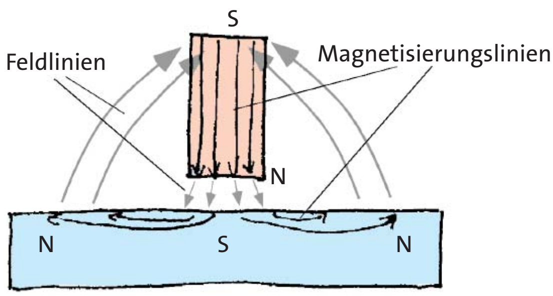


Abb. 18.26 Der Nordpol des Weicheisens besteht aus zwei Teilen, die durch den Südpol getrennt sind.

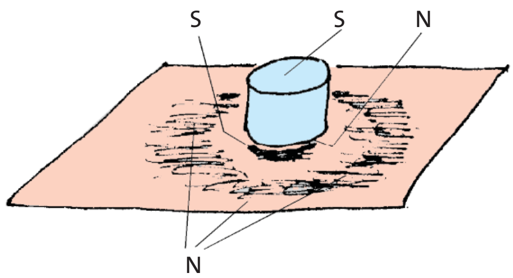


Abb. 18.27 Der Nordpol der Weicheisenplatte umgibt den Südpol ringförmig.

Man stellt fest: Am Weicheisenstab bildet sich ein Südpol in der Nähe des Nordpols des Magneten. In einiger Entfernung von diesem Südpol bildet sich auf jeder Seite ein Nordpol. Die magnetische

Ladung ist hier allerdings stärker verdünnt als an dem Südpol in der Mitte. Wie sieht die Polverteilung nun bei der ursprünglichen Anordnung aus, als wir nicht einen Stab, sondern eine ausgedehnte Platte vor den Magneten gehalten hatten? Der Südpol bildet sich direkt vor dem Nordpol des Magneten. Der Nordpol der Weicheisenplatte ist in diesem Fall ringförmig, Abb. 18.27.

Aufgabe

1. Zeichne Magnetisierungslinien und Feldlinien für den Magneten in Abb. 18.28a. In die Mitte des Feldgebiets wird eine kleine Weicheisenplatte gebracht, Abb. 18.28b. Wie sehen jetzt Magnetisierungs- und Feldlinien aus?

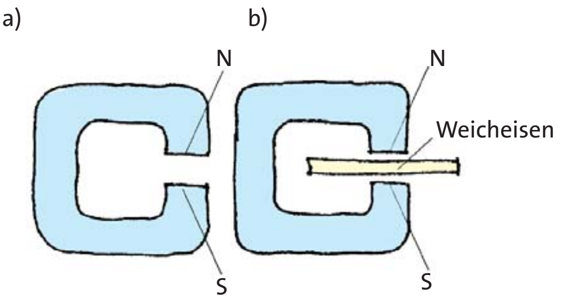


Abb. 18.28 Wie verlaufen Magnetisierungs- und Feldlinien vor und nach dem Einbringen der Weicheisenplatte?

18.8 Die Energie des magnetischen Feldes

Um zwei starke Magneten, die aneinander hängen, voneinander zu entfernen, muss man sich anstrengen, man muss Energie aufwenden. Wohin geht diese Energie?

In einer geringen Entfernung von einem kräftigen Magneten — der Magnet ist am Tisch befestigt — liegt ein anderer kräftiger Magnet. Der erste Magnet zieht den zweiten zu sich heran. Der sich bewegende Magnet kann für kurze Zeit etwas antreiben, einen Dynamo zum Beispiel. Hierzu ist Energie notwendig. Woher kommt diese Energie?

Vergleiche die beiden Situationen. Im ersten Fall wird Energie (von der Person, die die Magneten voneinander trennt) aufgewendet, und es entsteht magnetisches Feld. Im zweiten Fall wird Energie abgegeben (an den Dynamo), und es verschwindet magnetisches Feld. Wir schließen, dass im magnetischen Feld Energie enthalten ist.

Das magnetische Feld enthält Energie.

18.9 Elektrischer Strom und magnetisches Feld

Ein langer Draht wird so aufgehängt wie es Abb. 18.29 zeigt. Der Draht kann mit einem Autoakku verbunden werden, sodass ein elektrischer Strom in ihm fließt: im rechten Teil nach unten und im linken nach oben. Man darf den Stromkreis nur für eine kurze Zeit schließen, denn der Widerstand des Drahtes ist sehr gering, und es fließt ein Strom von über 50 A. Wir schauen auf die hängenden Drahtstücke und schließen kurz den Stromkreis: Die Drahtstücke springen auseinander. Irgendetwas hat sie voneinander weggedrückt.

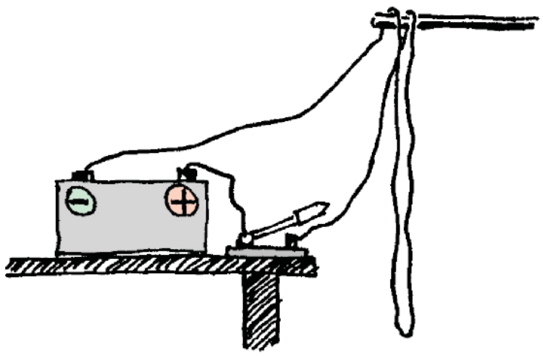


Abb. 18.29 Beim Schließen des Stromkreises springen die Drähte voneinander weg.

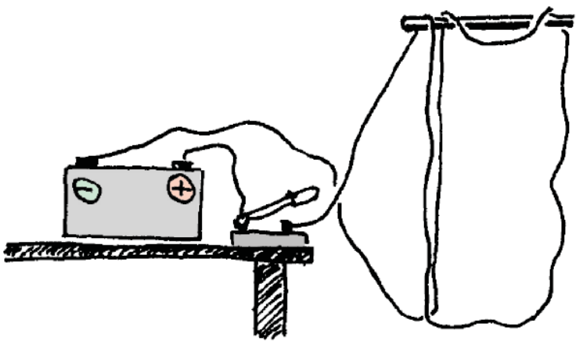


Abb. 18.30 Beim Schließen des Stromkreises springen die Drähte aufeinander zu.

Wir wiederholen das Experiment, verlegen den Draht aber so, dass der Strom in den senkrecht nebeneinander hängenden Drahtabschnitten in dieselbe Richtung fließt, Abb. 18.30. Diesmal springen die Drahtteile beim Schließen des Stromkreises aufeinander zu.

Welches ist die Verbindung, über die der eine Draht am anderen zieht oder auf den anderen drückt?

Die Antwort lässt sich leicht finden. Wir bringen in die Nähe eines einzelnen Drahtes, durch den ein starker elektrischer Strom fließen kann, eine Kompassnadel. Sobald man den elektrischen Strom einschaltet, richtet sich die Kompassnadel in eine bestimmte Richtung aus, Abb. 18.31. Unterbricht man den Stromkreis wieder, so pendelt die Nadel in ihre ursprüngliche Richtung zurück. Der Draht ist also offensichtlich von einem magnetischen Feld umgeben, solange ein elektrischer Strom in ihm fließt.

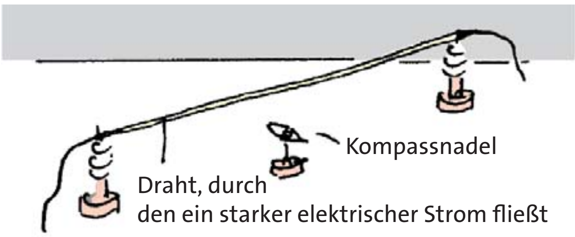


Abb. 18.31 Sobald man den elektrischen Strom einschaltet, ändert die Kompassnadel ihre Richtung.

Wir untersuchen die Richtung und Dichte des Feldes, indem wir eine Kompassnadel um einen senkrecht hängenden Draht herumführen. Es zeigt sich, dass die Richtung des Feldes überall senkrecht zur Drahtrichtung ist. Außerdem liegt jeder Feldrichtungspfeil auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt sich auf der Achse des Drahtes befindet.

Die Dichte des Feldes nimmt nach außen hin, d. h., wenn man sich vom Draht entfernt, ab. Abb. 18.32a zeigt das Feld in der Punktdarstellung, Abb. 18.32b mit Pfeilen und Abb. 18.32c mit Feldlinien. Man sieht, dass das Feld nicht mit den Pfeilspitzen oder Pfeilenden am Draht hängt, sondern mit den Seiten der Pfeile. Wir brauchen also nicht nach Magnetpolen zu suchen — die kann es hier nicht geben.

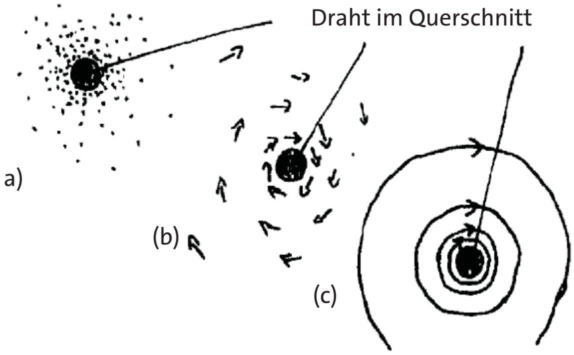


Abb. 18.32 Drei verschiedene Darstellungen des magnetischen Feldes in der Umgebung eines elektrischen Stromes.

Es wäre sowieso sehr merkwürdig gewesen, wenn wir am Draht Pole gefunden hätten: Der Draht ist aus Kupfer, einem nicht magnetisierbaren Material.

> Ein elektrischer Strom ist von einem magnetischen Feld umgeben. Fließen in zwei parallelen Drähten elektrische Ströme in dieselbe Richtung, so zieht das Feld die Drähte aufeinander zu. Fließen die Ströme in entgegengesetzte Richtungen, so drückt das Feld die Drähte voneinander weg.

Die Anziehung und Abstoßung zwischen elektrischen Strömen hat wichtige technische Anwendungen gefunden. Bevor diese möglich wurden, musste man allerdings noch erreichen, dass diese Anziehungs- und Abstoßungseffekte stärker werden. Wenn man mit einem Strom von 50 A zwei herabhängende Drähte gerade etwas in Bewegung bringt, so ist der Aufwand im Verhältnis zur Wirkung einfach viel zu groß.

Man kann nun das durch elektrische Ströme verursachte magnetische Feld durch einen Trick sehr viel dichter machen: Man führt ein und denselben Draht einfach mehrere Male an derselben Stelle vorbei, oder noch besser, man wickelt ihn zu einer Spule auf.

In Abb. 18.33 wurde der Draht 100-mal im Kreis herumgeführt. Wenn nun im Draht ein Strom von nur 1 A fließt, so fließt durch den eingezeichneten Querschnitt ein Strom der Gesamtstärke 100 A. Wir haben daher in der Umgebung

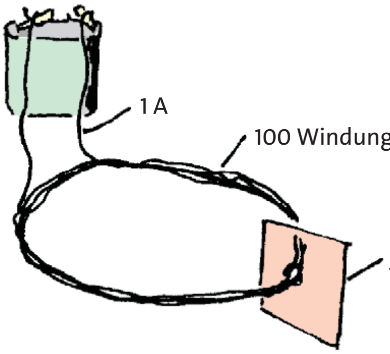


Abb. 18.33 Das Feld des Drahtbündels ist so dicht wie das eines Drahtes, in dem ein Strom von 100 A fließt.

dieses Drahtbündels ein magnetisches Feld, das so dicht ist wie das eines einzigen Drahtes, in dem ein elektrischer Strom der Stärke 100 A fließt.

Eine nützliche Anordnung stellt eine Spule dar. Der Draht wird hier zylinderförmig in vielen Lagen übereinander gewickelt, Abb. 18.34. (Der Draht muss natürlich isoliert sein — andernfalls könnte sich der Strom einen kürzeren Weg suchen.)

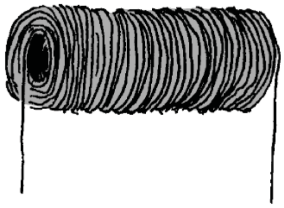


Abb. 18.34 Zylinderförmige Spule

Wir untersuchen Richtung und Dichte des Feldes einer Spule, z. B. mithilfe von Eisenfeilspänen. Das Ergebnis zeigt Abb. 18.35. Das Feld ist im Innern der Spule am dichtesten. Es hat dort ungefähr die Richtung der Zylinderachse.

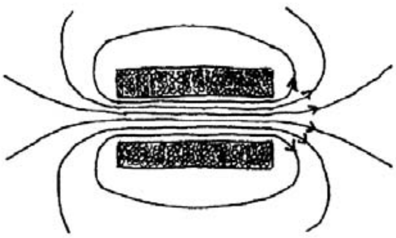


Abb. 18.35 Feld einer zylinderförmigen Spule

Aufgaben

1. Wie muss man eine Spule wickeln, damit in ihrer Umgebung und in ihrem Innern kein magnetisches Feld entsteht, wenn ein elektrischer Strom durch sie hindurchfließt?
2. In welche Richtung drückt das magnetische Feld einer Spule auf die Drähte der Spule? Wie hängt dieser Druck mit der Richtung des elektrischen Stroms in der Spule zusammen?

18.10 Der Elektromagnet

Ein Magnet wird auf einen kleinen Wagen montiert. Der Wagen wird so vor eine Spule gestellt, wie es Abb. 18.36 zeigt. Schließt man den Stromkreis der Spule, so wird der Magnet mit dem Wagen zur Spule hingezogen oder von ihr weggeschoben — je nach der Richtung des elektrischen Stroms in der Spule.

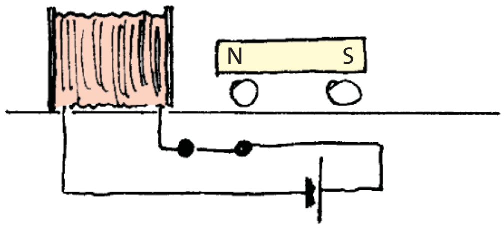


Abb. 18.36 Der Magnet wird durch das Feld nach rechts gedrückt.

Wir lassen den Strom so fließen, dass das Feld den Wagen von der Spule wegdrückt und stellen den Wagen nun in eine solche Entfernung von der Spule, dass er gerade nicht mehr weiter weggedrückt wird, Abb. 18.37.

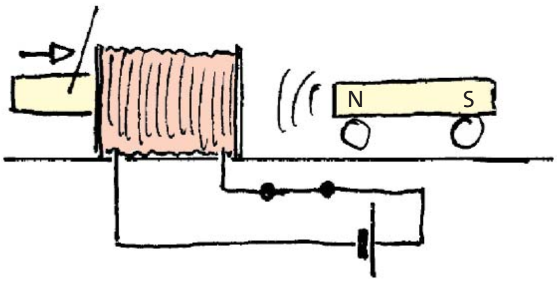


Abb. 18.37 Schiebt man einen Eisenkern in die Spule, so wird der Magnet noch weiter nach rechts geschoben.

Wir schieben dann von links ein Stück Weicheisen, einen Eisenkern, in die Spule hinein. Daraufhin setzt sich der Wagen erneut in Bewegung. Er wird noch weiter von der Spule weggedrückt.

Wie kommt das? Wir erinnern uns daran, was passiert, wenn man ein Stück Weicheisen in ein magnetisches Feld schiebt:
- das Weicheisen wird magnetisiert und es bilden sich Pole;
- das Feld wird verdrängt.

In unserem Fall wird das Feld aus der Spule hinausgedrängt. Danach ist es am dichtesten an den beiden Enden des Eisenkerns, Abb. 18.38. Die Pole entstehen an den Endflächen des Eisenkerns.

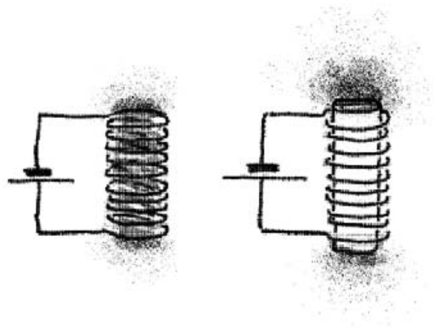


Abb. 18.38 Das magnetische Feld wird durch den Eisenkern aus der Spule hinausgedrängt.

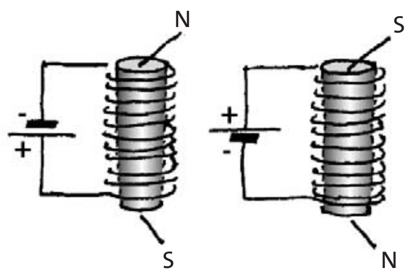


Abb. 18.39 Kehrt man die Richtung des elektrischen Stroms in der Spule um, so vertauschen sich die Pole des Magneten.

Abb. 18.39 zeigt den Zusammenhang zwischen der Magnetisierungsrichtung und der Richtung des elektrischen Stroms in der Spule.

Wir haben also unser Weicheisenstück in einen Magneten verwandelt. Weicheisen und Spule zusammen bilden einen Elektromagneten.

Elektromagneten haben gegenüber Dauermagneten den Vorteil, dass man sie ein- und ausschalten kann. Ja, man kann sie sogar stark und schwach stellen, und man kann sie umpolen.

Die Abb. 18.40 bis Abb. 18.42 zeigen einige Beispiele dafür, wie man mithilfe von Elektromagneten Anziehung und Abstoßung erreichen kann.

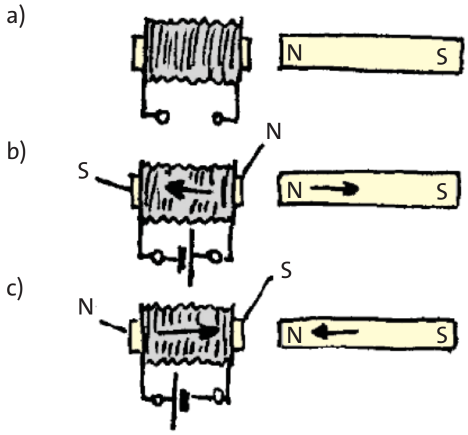


Abb. 18.40 Elektromagnet und Dauermagnet

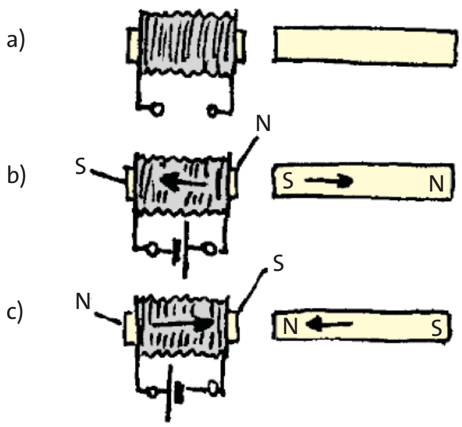


Abb. 18.41 Elektromagnet und Weicheisen

In Abb. 18.40a ist der Elektromagnet noch ausgeschaltet. In Abb. 18.40b drückt der Nordpol des Elektromagneten mithilfe des Feldes den Dauermagneten weg. In Abb. 18.40c wurde die Richtung des elektrischen Stroms in der Spule umgekehrt. Wo vorher der Nordpol des Elektromagneten war, ist jetzt der Südpol. Der Südpol des Elektromagneten zieht den Nordpol des Dauermagneten mithilfe des Feldes zu sich hin.

In Abb. 18.41 wird statt eines Dauermagneten ein Stück Weicheisen vor den Elektromagneten gebracht. Solange der Elektromagnet ausgeschaltet ist, Abb. 18.41a, passiert nichts, es gibt keinerlei Magnetpole. Der Elektromagnet wird nun eingeschaltet, Abb. 18.41b. Am rechten Ende des Elektromagneten entsteht ein Nordpol, am linken Ende des Weicheisenstücks ein Südpol. Die Pole bewegen sich aufeinander zu. Wir lassen nun den elektrischen Strom in die entgegengesetzte Richtung fließen, Abb. 18.41c. Die Pole des Elektromagneten vertauschen sich, aber auch die des Weicheisenstücks. Wir haben daher wieder Anziehung.

Abb. 18.42 schließlich zeigt zwei Möglichkeiten dafür, wie man zwei Elektromagneten miteinander kombinieren kann. Im ersten Bild haben wir Abstoßung, im zweiten Anziehung.

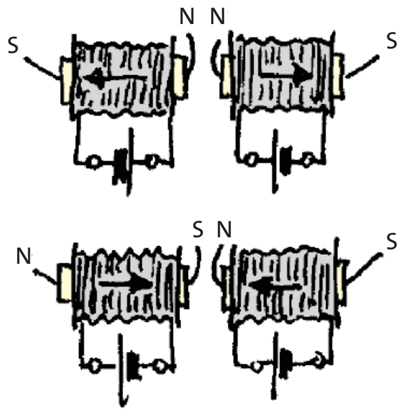


Abb. 18.42 Zwei Elektromagneten

Elektromagneten haben viele Anwendungen gefunden. Die wichtigste ist der Elektromotor. Wir beschäftigen uns mit ihm ausführlich im nächsten Abschnitt. Hier zunächst noch einige einfachere Geräte, die mit Elektromagneten arbeiten.

Die elektrische Klingel

Wenn man auf den Klingelknopf drückt, wird der elektrische Stromkreis zunächst geschlossen, Abb. 18.43. Der Elektromagnet zieht das Weicheisenstück an, der Klöppel schlägt gegen die Glocke. Durch das Anziehen des Weicheisenstücks wird aber der Stromkreis unterbrochen. Der Elektromagnet lässt daraufhin das Weicheisen wieder los, der Stromkreis wird wieder geschlossen und so weiter. Der Klöppel schlägt also in schneller Folge gegen die Glocke. Ähnlich funktioniert auch die Autohupe.

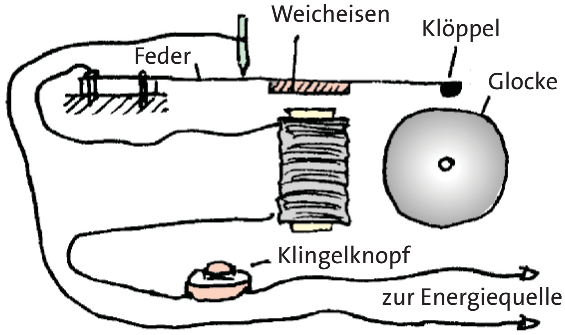


Abb. 18.43 Elektrische Klingel

Der elektrische Türöffner

Im Türrahmen, dort wo die Vertiefungen für die Riegel des Schlosses sind, befindet sich ein Elektromagnet. Wenn man seinen Stromkreis schließt, gibt er den Riegel, den man mit der Türklinke von innen her betätigen kann, frei. Man kann nun die Tür von außen her aufdrücken.

Die elektrische Uhr

In elektrischen Uhren, die keine Flüssigkristallanzeige haben, befindet sich ein Elektromagnet. Durch diesen Elektromagneten geht in regelmäßigen zeitlichen Abständen, z. B. jede Sekunde, ein kurzer Stromstoß. Bei jedem solchen Stromstoß rückt der Elektromagnet die Zeiger der Uhr ein Stück vor.

Amperemeter

Ein Elektromagnet zieht oder drückt umso stärker, je stärker der elektrische Strom ist, der durch ihn hindurchfließt. Diese Tatsache nutzt man aus, um die Stärke eines elektrischen Stroms zu messen. Abb. 18.44 zeigt, wie ein Amperemeter funktionieren könnte.

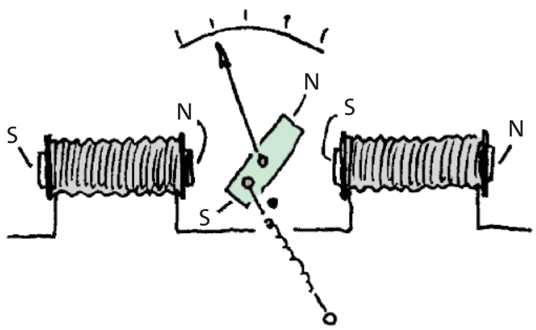


Abb. 18.44 Zur Funktionsweise des Amperemeters

Fließt ein elektrischer Strom durch die beiden Elektromagneten, so entstehen an deren Endflächen Pole. Das magnetische Feld zieht den Nordpol des Dauermagneten zum Südpol des rechten Elektromagneten und den Südpol des Dauermagneten zum Nordpol des linken Elektromagneten. Je stärker der elektrische Strom ist, desto größer ist die Polladung an den Elektromagneten und desto stärker zieht das Feld. Und je stärker das Feld zieht, desto weiter drehen sich Dauermagnet und Zeiger.

Der Aufbau eines echten Amperemeters ist etwas anders, aber das Funktionsprinzip ist dasselbe wie das unseres primitiven Geräts von Abb. 18.44.

Sicherungsautomaten

Eine Haussicherung soll einen elektrischen Stromkreis unterbrechen, sobald der elektrische Strom zu stark wird. Ein Sicherungsautomat funktioniert so: Der elektrische Strom (im abzusichernden Stromkreis) wird durch die Spule eines Elektromagneten geleitet. Wenn die Stromstärke einen bestimmten Wert erreicht, schafft es der Magnet, einen Schalter zu betätigen, der den Stromkreis unterbricht.

Das Relais

Oft möchte man mit einem schwachen Strom einen starken Strom steuern. Ein Gerät, mit dem man das machen kann, ist das Relais, Abb. 18.45. Schließt man den Schalter S, so fließt im Stromkreis des Elektromagneten ein schwacher Strom. Der Elektromagnet zieht an dem Weicheisenstück und schließt einen Stromkreis, in dem ein sehr starker Strom fließen kann.

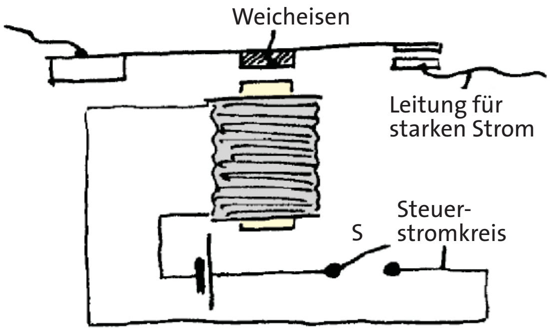


Abb. 18.45 Relais

Eine Anwendung des Relais, die du vielleicht kennst: Wenn man den Zündschlüssel des Autos bis zum Anschlag dreht, beginnt der Anlassermotor zu laufen. (Der Anlassermotor ist ein Elektromotor, der den Benzinmotor des Autos „anwirft“. Er bekommt seine Energie von der Autobatterie.) Durch den Anlassermotor fließt ein sehr starker elektrischer Strom, ein Strom von etwa 100 A. Für einen so starken Strom braucht man einen sehr großen, robusten Schalter. Ein solcher Schalter wäre aber zu groß, um ihn am Zündschloss unterzubringen. Daher schaltet man den Anlasserstrom über ein Relais ein und aus. Der schwache Steuerstrom des Relais wird mit dem kleinen Schalter am Zündschloss ein- und ausgeschaltet.

Aufgaben

1. In welchen Geräten werden Elektromagneten verwendet? Nenne auch Geräte, die im Text nicht vorkommen.
2. Erfinde eine elektrische Klingel, die nur mit Wechselstrom funktioniert.
3. Wie reagiert das Amperemeter von Abb. 18.44 auf einen Wechselstrom? Erfinde ein Wechselstromamperemeter.

18.11 Der Elektromotor

Wir wollen einen Elektromotor selbst bauen. Wir beginnen mit einer sehr primitiven Version. Unser Motor hat Ähnlichkeit mit dem Stromstärkemessgerät von Abb. 18.44.

Abb. 18.46 zeigt ihn von oben gesehen. Rechts und links steht ein Elektromagnet. Dazwischen befindet sich, drehbar gelagert, ein Dauermagnet. Wir schalten den elektrischen Strom ein. An den Stirnflächen der Elektromagneten bilden sich Pole. Der Stabmagnet in der Mitte dreht sich nun so, Abb. 18.46a, dass sich die ungleichnamigen Pole möglichst nahe kommen. Sobald der Dauermagnet in Längsrichtung steht, d. h. parallel zu den Elektromagneten, vertauschen wir die beiden Anschlüsse der Batterie miteinander. Dadurch vertauschen sich alle Pole der Elektromagneten. Die Felder drücken nun die benachbarten Pole voneinander weg. Die Drehung des Stabmagneten geht also weiter, Abb. 18.46b. Nach einer weiteren halben Drehung müssen wir wieder umpo-

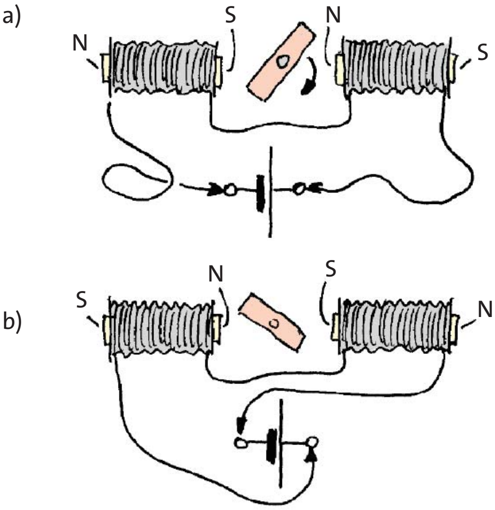


Abb. 18.46 Zur Funktionsweise des Elektromotors

len und so weiter. Die Felder halten so den Dauermagneten in ständiger Drehung.

Du wirst allerdings feststellen, dass es sehr schwer ist, die Elektromagneten genau im richtigen Zeitpunkt umzupolen. Man kommt dabei sehr leicht aus dem Takt. Und mit einem solchen handgesteuerten Elektromotor kann man sowieso nicht viel anfangen. Wir brauchen einen Motor, der sich selbst steuert, einen Motor, der die Stromrichtung in seinen Spulen automatisch nach jeder halben Drehung umkehrt.

Es stellt nun aber gar kein Problem dar, eine automatische Steuerung zu bauen. Wir brauchen nur an der Motorwelle einen Schalter anzubringen, der durch die Rotation der Welle betätigt wird.

Besonders bequem lässt sich dieses Umschalten realisieren, wenn man die Rollen von Dauermagnet und Elektromagnet vertauscht: Man macht den Elektromagneten drehbar und lässt den Dauermagneten fest, Abb. 18.47.

Man sagt auch, der Elektromagnet sei der Rotor des Motors. Die Elektrizitätszuleitung und -ableitung geschieht über zwei Schleifkontakte und einen Schleifring, der in zwei voneinander isolierte Hälften geteilt ist. An diese beiden Hälften ist der Elektromagnet angeschlossen.

Nach jeder halben Drehung des Rotors wechseln die Schleifringhälften von einem Schleifkontakt zum anderen: Der Anschluss des Elektromagneten, der vorher auf hohem Potenzial lag,

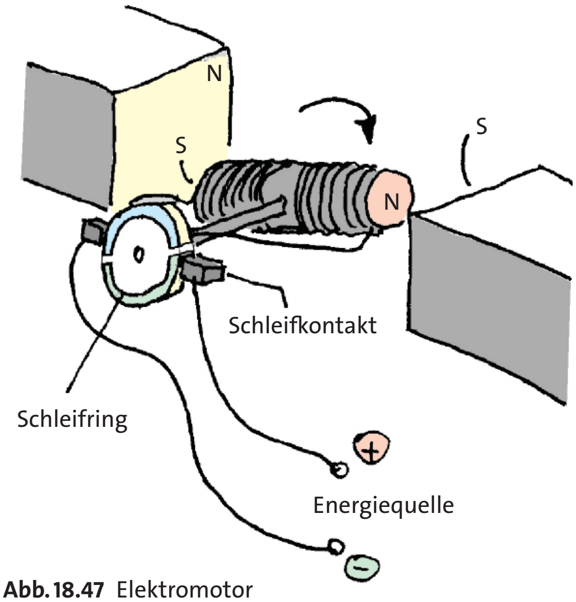


Abb. 18.47 Elektromotor

kommt nun auf niedriges Potenzial, und der, der auf niedrigem Potenzial war, kommt auf hohes. Der Strom im Elektromagneten wechselt also immer im gewünschten Augenblick die Richtung.

Viele richtige Elektromotoren funktionieren nach diesem Prinzip. Es gibt allerdings noch eine ganze Reihe weiterer Tricks, die bei der Konstruktion von Elektromotoren angewendet werden. Eins haben aber alle Elektromotoren gemeinsam: Es ist immer das magnetische Feld, das auf den Rotor drückt oder an ihm zieht.

Aufgaben

1. Man kann den „Motor“ von Abb. 18.46 als Wechselstrommotor verwenden. Man braucht ihn dann nicht mehr von Hand umzupolen. Man nennt einen solchen Motor einen Synchronmotor. Welche Probleme ergeben sich?
2. Entwirf einen Elektromotor, bei dem sowohl der feste als auch der drehbare Magnet ein Elektromagnet ist.

18.12 Das magnetische Feld der Erde

Wir hatten früher schon gesehen: Hängt man einen Stabmagneten so auf, dass er sich um eine senkrechte Achse sehr leicht drehen lässt, so stellt er sich ungefähr in Nord-Süd-Richtung ein. Einer

Abb. 18.48 Ein drehbar gelagerter Magnet stellt sich in Nord-Süd-Richtung ein.

seiner Pole weist nach Nord, der andere nach Süd, Abb. 18.48. Dasjenige Ende des Magneten, das in Richtung Nord zeigt, wurde Nordpol genannt, das andere Südpol.

Jeder Kompass beruht auf diesem Effekt. Die Kompassnadel ist einfach ein leichter, sehr gut gelagerter Dauermagnet.

Tatsächlich stellt sich nun eine Kompassnadel nicht genau in Nord-Süd-Richtung ein. Außerdem ist die Abweichung von dieser Richtung an den verschiedenen Stellen der Erde verschieden. Und sie ändert sich sogar noch langsam mit der Zeit.

Auf jeden Fall können wir aber schließen, dass die Erde von einem magnetischen Feld umgeben ist. Und man hat festgestellt, dass dieses magnetische Feld ins Innere der Erde hineinreicht.

Woher kommt dieses Feld? Zwei Ursachen kommen zunächst in Frage. Entweder ist die Erde selbst ein riesiger Dauermagnet, oder in der Erde fließen elektrische Ströme. Früher glaubte man an die erste dieser beiden Hypothesen; man meinte, die Erde sei ein großer Dauermagnet. Dann müsste die Nordpolladung der Erde in der Nähe des (geographischen) Südpols der Erde sitzen, und die Südpolladung am (geographischen) Nordpol, denn die Nordpolladung eines Magneten wird ja nach Norden gezogen.

Man erkannte aber schon im 19. Jahrhundert, dass diese Vermutung falsch sein muss. Im Innern der Erde ist es nämlich so heiß, dass jedes Material seinen Magnetismus verliert. Die Ursache für das magnetische Feld der Erde sind also elektrische Ströme. Sie werden angetrieben durch die thermische Konvektion des flüssigen Eisens im Erdkern. Die Einzelheiten dieses Prozesses sind allerdings etwas verwickelt.

Aufgaben

1. Warum zeigt ein Kompass falsch an, wenn sich Eisenteile in seiner Umgebung befinden?
2. Zwei Kompassnadeln werden ganz dicht nebeneinander aufgestellt. In welche Richtung zeigen sie?

18.13 Induktion

An eine Spule wird ein Voltmeter angeschlossen. Bewegt man einen Dauermagneten in die Spule hinein, Abb. 18.49, so schlägt das Voltmeter aus – allerdings nur so lange, wie sich der Magnet bewegt. Entfernt man den Magneten wieder aus der Spule, so schlägt das Messinstrument noch einmal aus, diesmal aber in die andere Richtung als vorher.

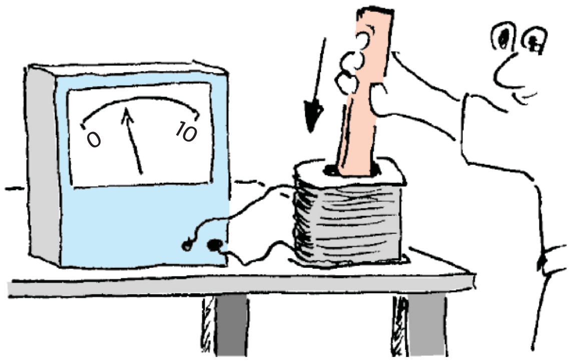


Abb. 18.49 Das Voltmeter schlägt aus, solange sich der Dauermagnet bewegt.

Die Richtung des Ausschlags hängt auch davon ab, ob man den Nord- oder den Südpol in die Spule schiebt.

Mit der Bewegung des Magneten ändert man das magnetische Feld im Innern der Spule. Diese Änderung des magnetischen Feldes ist die Ursache für die Spannung zwischen den Anschlüssen der Spule.

Wir fragen uns nun, was passiert, wenn man die Spule bei dem Experiment kurzschließt. Wir schließen sie also kurz, bauen aber ein Amperemeter in die Leitung, mit der wir die Spulenanschlüsse überbrücken, ein. Ergebnis: Beim Hineinbewegen des Magneten schlägt das Amperemeter aus und beim Herausbewegen wieder (wie du es wahrscheinlich nicht anders erwartet hast).

Man nennt diese Vorgänge Induktion. Man sagt, beim Bewegen des Magneten werde eine Spannung oder ein elektrischer Strom induziert.

Je stärker sich das Feld in der Spule ändert, desto größer ist die induzierte Spannung. Wir versuchen nun, eine möglichst hohe Induktionsspannung zu erzeugen. Wir brauchen dazu nur dafür zu sorgen, dass sich das Feld in der Spule möglichst schnell möglichst stark ändert.

Wir stellen zunächst fest, dass die Spannung umso höher wird, je schneller man den Dauermagneten bewegt. Eine sehr, sehr schnelle Bewegung ändert aber schließlich nichts mehr am Ausschlag des Messinstruments. Das liegt allerdings nur daran, dass das Messinstrument „nicht mehr mitkommt", es ist zu träge. Verwendet man zur Anzeige ein Oszilloskop, so sieht man, dass bei der sehr schnellen Bewegung die Spannung sehr wohl noch höher geworden ist.

Als Nächstes machen wir die Feldänderung dadurch stärker, dass wir statt einen, zwei Magneten in die Spule hineinbewegen, und zwar so, dass gleiche Pole nebeneinander liegen, Abb. 18.50.

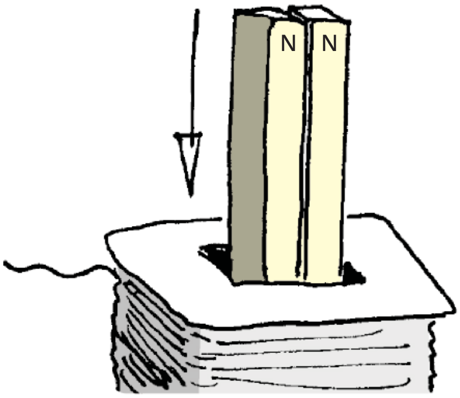


Abb. 18.50 Ist das magnetische Feld dichter, so wird eine größere Spannung induziert.

Eine dritte Methode, den Induktionseffekt zu verstärken, besteht darin, dass man eine Spule mit mehr Windungen benutzt.

Man kann aber die Feldänderung in der Spule noch auf eine ganz andere Art erreichen — und zwar ohne dass sich irgendetwas bewegt: indem man neben die Spule einen Elektromagneten stellt, sodass dessen Feld in die Spule hineinreicht, Abb. 18.51. Schaltet man diesen Elektromagneten ein oder aus, so ändert sich wieder das magnetische Feld im Innern der Spule, und es wird eine Spannung induziert.

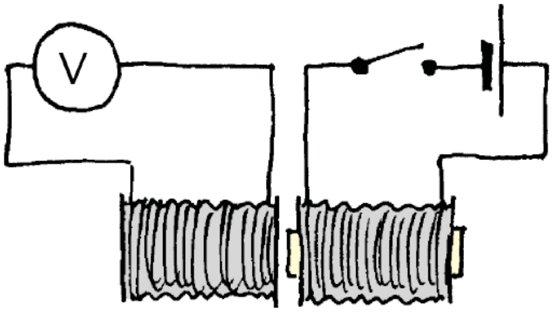


Abb. 18.51 Schaltet man den Elektromagneten ein oder aus, so ändert sich die Dichte des magnetischen Feldes in der Spule, und es wird eine Spannung induziert.

> Ändert sich das magnetische Feld in einer Spule, so entsteht zwischen den Anschlüssen der Spule eine elektrische Spannung. Bei geschlossenem Stromkreis fließt ein elektrischer Strom. Man nennt diesen Vorgang Induktion.

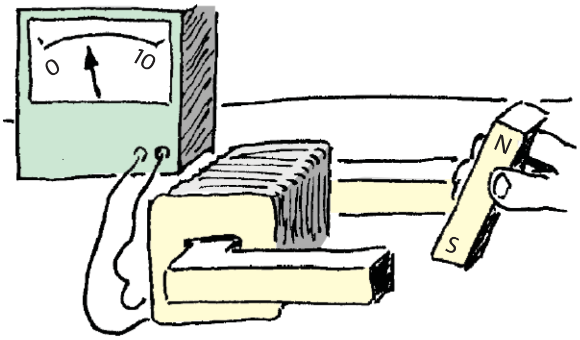


Abb. 18.52 Auch die Änderung der Magnetisierung im Innern der Spule verursacht eine Induktionsspannung.

Wir führen schließlich noch eine andere Variante des Induktionsexperiments durch. Wir schieben in die Spule einen Weicheisenkern hinein und verlängern die Enden des Kerns so, dass der ganze Kern ein „U" bildet. In die Spule kann nun kein magnetisches Feld mehr eindringen. Gibt es jetzt auch keine Induktion mehr? Wir nähern den Enden des Weicheisenkerns einen Dauermagneten, Abb. 18.52, bis die Pole des Magneten diese Enden berühren und stellen fest: Das Voltmeter schlägt aus. Wie ist das möglich? In der Spule ist doch gar nichts passiert. Doch, es ist sehr wohl etwas passiert! Das Eisen in der Spule ist magnetisiert worden, seine Magnetisierung hat sich geändert.

Wir drehen nun den Dauermagneten um, sodass sein Nordpol dahin kommt, wo vorher sein Südpol war und sein Südpol dahin, wo vorher der Nordpol war. Auch bei diesem Vorgang wird in der Spule eine Spannung induziert. Das Ergebnis dieses Versuchs ist also:

> Auch wenn sich die Magnetisierung des Materials in der Spule ändert, wird eine Spannung (ein Strom) induziert.

Die Funktionsweise einiger wichtiger Geräte beruht auf der Induktion. Wir lernen im Folgenden solche Geräte kennen.

Aufgaben

1. In einer Spule soll mithilfe eines Dauermagneten eine Spannung induziert werden. Wie muss man es anstellen, damit die Spannung möglichst hoch wird? Nenne drei verschiedene Maßnahmen.
2. Eine Spule wird so gehalten, dass ihre Achse senkrecht steht, sodass man einen Gegenstand durch das Innere der Spule hindurchfallen lassen kann. An die Spule wird ein Oszilloskop angeschlossen. Man lässt einen Stabmagneten in Längsrichtung durch die Spule fallen. Was zeigt das Oszilloskop an?

18.14 Der Generator

Ein Generator tut gerade das Umgekehrte von dem, was ein Elektromotor tut. Während ein Elektromotor Energie mit dem Träger Elektrizität bekommt und mit dem Träger Drehimpuls abgibt, Abb. 18.53a, bekommt der Generator die Energie mit dem Energieträger Drehimpuls und gibt sie mit der Elektrizität wieder ab, Abb. 18.53b.

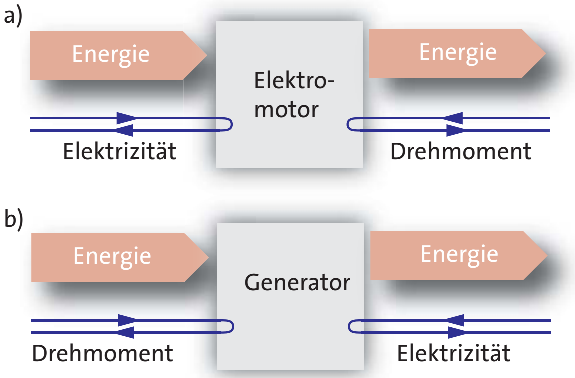


Abb. 18.53 Flussbilder von Elektromotor und Generator

Der Aufbau eines Generators unterscheidet sich daher im Prinzip auch gar nicht von dem eines Elektromotors. Wir können den in Abb. 18.47 skizzierten Motor als Generator benutzen. Wir brauchen dazu nur die elektrische Energiequelle durch einen elektrischen Energieempfänger, z. B. eine Lampe, zu ersetzen. Dreht man nun sehr schnell an der Welle, so beginnt die Lampe zu leuchten. Die Erklärung der Funktionsweise des Generators ist nicht schwierig: Der Eisenkern der drehbaren Spule wird durch die feststehenden Dauermagneten pro Umdrehung zweimal ummagnetisiert. Dabei wird jedes Mal eine Spannung zwischen den Enden der Spule induziert. Das Vorzeichen dieser Spannung wechselt zweimal pro Umdrehung. Die Schleifkontakte und der zweigeteilte Schleifring sorgen dafür, dass man an den Anschlüssen des Generators eine Spannung mit immer gleichem Vorzeichen erhält. (Der Betrag dieser Spannung ist aber nicht zeitlich konstant; eine richtige Gleichspannung ist es also nicht.)

Es ist sogar noch einfacher, einen Wechselspannungsgenerator zu bauen. Weißt du wie?

Der Generator ist eine der wichtigsten Maschinen in jedem Kraftwerk.

Oft bezeichnet man Generatoren mit einem anderen Namen: Beim Fahrrad heißen sie Dynamo, beim Auto Lichtmaschine.

18.15 Der Transformator

Viele elektrische Geräte, wie z. B. elektrische Zahnbürste, Computer, Spielzeugmotoren und die La-

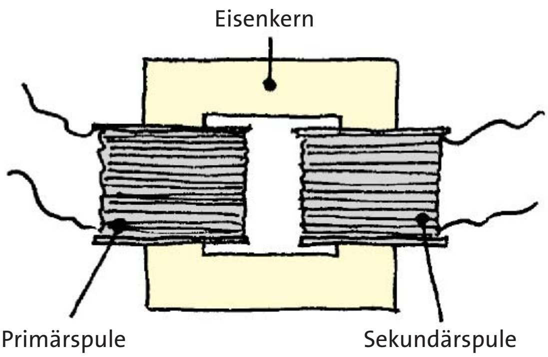


Abb. 18.54 Aufbau eines Transformators

degeräte von Handy und Smartphone, brauchen zum Betrieb eine viel kleinere Spannung als die 230 Volt der Steckdose. Will man diese Geräte ans Netz anschließen, so muss die Spannung von 230 Volt auf einen kleineren Wert heruntergesetzt oder „heruntertransformiert" werden. Zu diesem Zweck setzt man zwischen Gerät und Steckdose einen Transformator.

Ein Transformator besteht aus einem Eisenkern mit zwei Spulen, Abb. 18.54. Die eine Spule, die sogenannte Primärspule, wird an die Steckdose angeschlossen; mit der anderen, der Sekundärspule, verbindet man den Energieempfänger, d. h. das Gerät, das man mit Energie versorgen will.

Wir wollen uns mit der Funktionsweise des Transformators etwas vertraut machen. Wir verbinden die eine Spule eines Transformators mit einer Glühlampe und die andere über einen Schalter mit einer Batterie, Abb. 18.55.

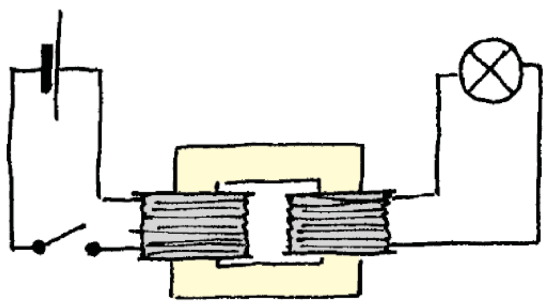


Abb. 18.55 Beim Öffnen und beim Schließen des Schalters leuchtet die Lampe kurz auf.

Schließt man nun den Schalter, so leuchtet die Lampe kurz auf. Öffnet man den Schalter wieder, so leuchtet sie wieder auf. Die Erklärung hierfür können wir leicht geben: Sowohl beim Schließen als auch beim Öffnen des Schalters ändert sich überall im Eisenkern die Magnetisierung. Da sie sich auch innerhalb der Sekundärspule ändert, wird zwischen den Anschlüssen dieser Spule eine Spannung induziert.

Damit die Lampe dauernd brennt, müsste man den elektrischen Strom in der Primärspule ständig, in schneller Folge, ein- und wieder ausschalten. Stattdessen kann man die Primärspule auch einfach mit einer Wechselspannungsquelle verbinden. Die in der Sekundärspule induzierte Spannung ist natürlich auch eine Wechselspannung. Wir sehen also, dass ein Transformator nur mit Wechselspannung funktioniert.

Wie schafft man es nun, eine Spannung mithilfe eines Transformators herunter- oder heraufzusetzen? Die Höhe der induzierten Spannung hängt von der Zahl der Windungen der beiden Spulen ab. Wir wollen untersuchen, in welcher Weise.

Wir bauen dazu Transformatoren zusammen aus Spulen der verschiedensten Windungszahlen. Wir stellen zunächst fest, dass, wenn die Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule gleich sind, auch Primär- und Sekundärspannung übereinstimmen. Hat die Sekundärspule doppelt so viele Windungen wie die Primärspule, so ist auch die Sekundärspannung doppelt so hoch wie die Primärspannung. Allgemein gilt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

wobei U_1 und U_2 die Spannungen an Primär- bzw. Sekundärspule sind und n_1 und n_2 die entsprechenden Windungszahlen.

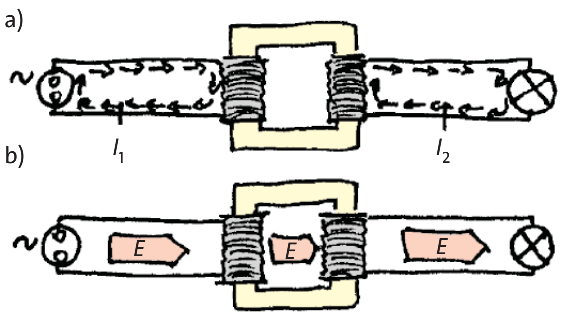


Abb. 18.56 Weg des elektrischen Stroms (a) und des Energiestroms (b) im Transformator

Während der elektrische Strom beim Transformator in zwei getrennten Stromkreisen fließt, Abb. 18.56a, fließt die Energie von der Primärseite zur Sekundärseite des Transformators hinüber, Abb. 18.56b

Die Stärke P_1 des Energiestroms, der in den Transformator hineinfließt, ist, von kleinen Verlusten abgesehen, genauso groß wie die Stärke P_2 des Energiestroms, der den Transformator verlässt. Es ist also $P_1 = P_2$. Und weil $P = U \cdot I$ ist, muss gelten

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 .$$

U_1, U_2, I_1 und I_2 sind die Spannungen und Stromstärken von Primär- bzw. Sekundärstromkreis. Aus der letzten Gleichung folgt, dass mit einer Abnahme der Spannung im Transformator eine Zunahme der elektrischen Stromstärke um denselben Faktor verbunden ist. Ebenso ist mit einer Zunahme der Spannung eine Abnahme der elektrischen Stromstärke um denselben Faktor verbunden.

Aufgaben

1. Die Spulen eines Transformators haben 1000 bzw. 5000 Windungen. Es steht eine Wechselspannung von 230 V zur Verfügung. Welche Spannungen kann man mit dem Transformator herstellen?
2. Die Primärspule eines Transformators ist an die Steckdose angeschlossen. An der Sekundärspule wird eine Spannung von 11,5 V gemessen. Was kann man über die Windungszahlen der Spulen des Transformators sagen? Im Sekundärstromkreis fließt ein elektrischer Strom von 2 A. Wie stark ist der Strom im Primärkreis?
3. Ein Transformator hat eine Primärspule mit 1000 Windungen und eine Sekundärspule mit 10 000 Windungen. Die Primärspule wird an die Steckdose angeschlossen. Es fließt ein Primärstrom von 100 mA. Wie groß sind Sekundärspannung und Sekundärstromstärke?
4. Durch den Transformator in Abb. 18.57 fließt ein Energiestrom von 100 kW. Welche Anforderungen sind an die Zuleitungen, welche an die Wegleitungen zu stellen? Warum transportiert man elektrizitätsgetragene Energie vorzugsweise mit Hochspannung?

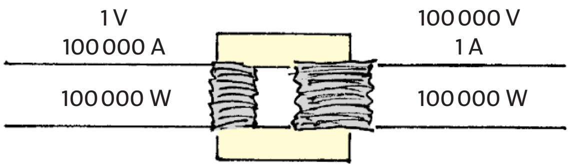


Abb. 18.57 Zu Aufgabe 4

18.16 Das magnetische Feld induzierter Ströme

Blättere noch einmal zurück zu Abschnitt 18.10. Wir hatten dort gesehen, dass ein Elektromagnet

- einen Dauermagneten anziehen und abstoßen kann, Abb. 18.44;
- einen anderen Elektromagneten anziehen und abstoßen kann, Abb. 18.46;
- aber ein Stück Weicheisen immer anzieht, Abb. 18.45.

a)

b)

c)

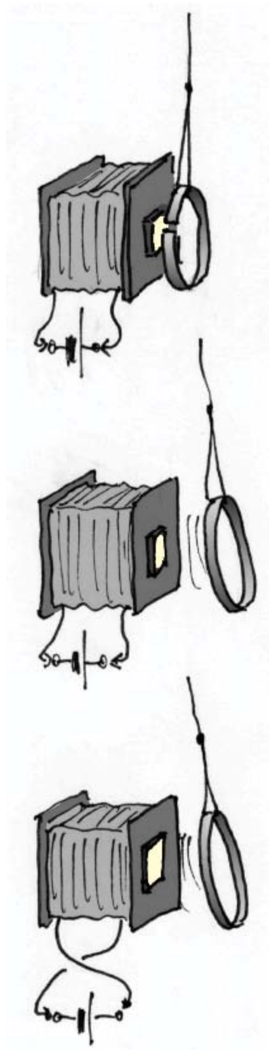


Abb. 18.58 (a) Ein nicht geschlossener Metallring wird weder angezogen noch abgestoßen. (b) und (c) Ein geschlossener Ring wird beim Einschalten des Elektromagneten immer weggedrückt, egal in welche Richtung der Strom fließt.

Wir machen nun einige Versuche, die den in Abschnitt 18.10 beschriebenen ähnlich sind, Abb. 18.58. Wir hängen zunächst neben einen Elektromagneten einen Metallring mit einem Schlitz. Wir schalten den Elektromagneten ein, und es passiert nichts — wie du es wohl auch erwartet hast. Ein elektrischer Leiter, in dem kein Strom fließt, ist schließlich kein Magnet, und er ist auch kein Weicheisenstück.

Wir ändern den Versuch nun ganz wenig ab: Wir nehmen einen Ring ohne Schlitz, d. h. ohne Unterbrechung. Der Elektromagnet wird wieder eingeschaltet. Resultat: Der Ring wird weggestoßen. Wie kommt das?

Es ist nur dadurch zu erklären, dass im Ring ein elektrischer Strom geflossen ist. Wie kommt dieser Strom zustande? Durch Induktion natürlich. Beim Einschalten des Elektromagneten ändert sich das magnetische Feld im Ring, sodass in ihm ein elektrischer Strom induziert wird. Dieser Strom wiederum verursacht ein magnetisches Feld. Beide Felder zusammen — das des Elektromagneten und das des Rings — bewirken die Abstoßung. Die Abstoßung verschwindet aber sofort wieder, denn das induzierte magnetische Feld existiert ja nur für sehr kurze Zeit: nur während des Einschaltens des Elektromagneten.

Wir machen das Experiment noch einmal, vertauschen aber vorher die Anschlüsse des Elektromagneten. Der Strom fließt also nach dem Einschalten in die andere Richtung als vorher. Die Beobachtung: Der Ring wird wieder weggedrückt. Überraschung! Oder doch nicht? Eigentlich war das Ergebnis zu erwarten: Wir haben ja erstens den Elektromagneten umgepolt. Zweitens hat aber auch der induzierte Strom seine Richtung gewechselt. Wir haben also beide „Magneten" (Elektromagnet und Ring) umgedreht. Und dabei verwandelt sich natürlich Abstoßung nicht in Anziehung.

Wir können damit eine Regel formulieren:

> Die Richtung des in einem Leiter induzierten Stroms ist so, dass Abstoßung entsteht zwischen dem Leiter und dem Magneten, der die Induktion verursacht.

18.17 Supraleiter

Es gibt Stoffe, die ihren elektrischen Widerstand verlieren, wenn man sie unter eine bestimmte Temperatur abkühlt. Man nennt sie Supraleiter. Die Übergangstemperatur vom normalen in den supraleitenden Zustand liegt bei manchen dieser Stoffe relativ hoch: bei etwa −180 °C. Man kann diese Stoffe recht leicht in den supraleitenden Zustand bringen, nämlich, indem man sie mit flüssigem Stickstoff kühlt.

Supraleiter sind aber nicht nur deshalb interessant, weil sie keinen elektrischen Widerstand haben. Sie haben außerdem überraschende magnetische Eigenschaften.

Wir bauen eine Anordnung aus Dauermagneten auf, deren Feld nach oben weist. Wir nähern dem Magneten nun von oben her ein kleines Stück supraleitenden Materials und lassen es los. Der Supraleiter fällt nicht herab, er schwebt über den Magneten, Abb. 18.59. Wir können ihn drehen, oder auch etwas zur Seite stoßen: Er bleibt in der Schwebe (natürlich nur so lange, bis er sich aufwärmt und in den normalen Zustand zurückkehrt).

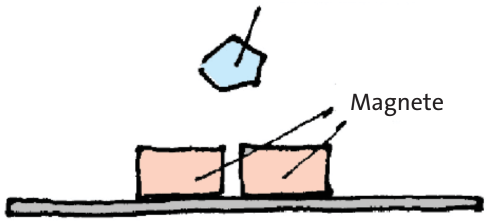


Abb. 18.59 Der Supraleiter wird durch das magnetische Feld in der Schwebe gehalten.

Der Supraleiter wird offensichtlich von den Magneten abgestoßen. Er verhält sich damit gerade umgekehrt wie ein Stück Weicheisen, das ja stets angezogen wird. Wie lässt sich das erklären? Wir erinnern uns an das Ergebnis des letzten Abschnitts. Dort hatten wir beobachtet, dass die Spule vom Elektromagneten stets abgestoßen wird.

Die Erklärung der Abstoßung des Supraleiters ist nun dieselbe: Sobald der Supraleiter in die

Nähe eines Magneten kommt, beginnen Ströme in ihm zu fließen, und diese sind so gerichtet, dass sich Abstoßung ergibt. In der Spule hörten die induzierten Ströme gleich wieder auf zu fließen, sie wurden durch den Widerstand der Spule abgebremst. Beim Supraleiter fließen die einmal angeworfenen Ströme aber weiter, solange man ihn über den Magneten hängen lässt. Einen Widerstand, der diese Ströme bremsen könnte, gibt es ja nicht.

Eine genauere Untersuchung, die wir hier aber nicht durchführen können, zeigt außerdem,

- dass die Ströme nur ganz dicht unter der Oberfläche des Supraleiters fließen;
- dass das magnetische Feld nicht in den Supraleiter eindringt.

Die Supraleiter haben also Eigenschaften, die denen der weichmagnetischen Stoffe sehr ähnlich sind. Auch sie lassen das magnetische Feld nicht in sich herein. Sie erreichen das aber durch einen anderen „Trick“: nicht durch das Ausbilden von magnetischen Polen, sondern durch das Anwerfen von elektrischen Strömen.

19 ELEKTROSTATIK

19.1 Ladung und Ladungsträger

Wenn sich in einem Draht Elektrizität von der einer Stelle zu einer anderen bewegt, sprechen wir von einem elektrischen Strom. Wir haben uns bisher mit den Wirkungen von Elektrizitätsströmen befasst und mit dem Zusammenhang zwischen der elektrischen Stromstärke und anderen Größen. Wir haben aber nie nach den Wirkungen und Eigenschaften der Elektrizität selbst gefragt. Man müsste diese am besten untersuchen können, wenn sich die Elektrizität nicht bewegt, wenn also kein elektrischer Strom fließt.

Nun muss man zugeben, dass man von der Elektrizität in einem Kupferdraht, der in keinen elektrischen Stromkreis eingebaut ist, nichts merkt. Woran liegt das? Eine mögliche Antwort wäre: Die ruhende Elektrizität hat eben keine Eigenschaften, durch die sie sich bemerkbar machen würde. Diese Antwort ist aber nicht richtig. Elektrizität macht sich sehr deutlich bemerkbar, und zwar schon dann, wenn sie in kleinsten Mengen vorliegt. Mit ihrer Beschreibung befasst sich die Elektrostatik. Dass man von ihr nichts merkt, wenn man ein Stück Kupferdraht vor sich hat, liegt an einer Eigenschaft, in der sich die Elektrizität von vielen anderen Größen unterscheidet: Sie kann positive und negative Werte annehmen.

Alle materiellen Stoffe enthalten Elektrizität, aber sie enthalten fast immer gleich große Mengen positiver wie negativer Elektrizität, sodass die Gesamtmenge null ist. So enthält 1 g Kupfer an positiver Elektrizität 44 032 C. Es enthält aber denselben Betrag an negativer Elektrizität; die Gesamtmenge beträgt also 0 C.

(Zum Vergleich: Die Masse, d. h. die Größe, die man in kg misst, kann nur positive Werte haben.)

> Die Elektrizität kann positive und negative Werte annehmen.

Was für einen Sinn hat es aber überhaupt, zu sagen, ein Körper, der die Elektrizitätsmenge 0 C hat, habe in Wirklichkeit eine ganz bestimmte Menge positiver und eine gleich große Menge negativer Elektrizität? 0 C heißt doch nichts anderes, als dass er eben keine Elektrizität hat. Dass es einen Sinn hat, zu sagen, Kupfer (oder irgendein anderer Stoff) enthalte sowohl positive als auch negative Elektrizität, erkennt man, wenn man die mikroskopische Struktur der Materie betrachtet.

Alle Stoffe bestehen aus Atomen und Atomgruppen, den Molekülen, und jedes Atom besteht aus den im Atomkern vereinigten Protonen und Neutronen und der Elektronenhülle. Zwei dieser Bestandteile des Atoms tragen Elektrizität. Das Proton trägt positive Elektrizität, und zwar ist

$$Q_{\text{Proton}} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C}.$$

Das Elektron trägt negative Elektrizität, nämlich

$$Q_{\text{Elektron}} = -1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C}.$$

Neutronen tragen keine Elektrizität. Es ist also

$$Q_{\text{Neutron}} = 0\ \text{C}.$$

Da ein Atom genauso viele Protonen wie Elektronen hat, ist die Elektrizitätsmenge, die das ganze Atom trägt, 0 C.

Es kommt vor, dass ein Atom ein Elektron oder mehrere Elektronen zu viel oder zu wenig hat. Man nennt ein solches Gebilde ein Ion. Die Elektrizitätsmenge der Ionen ist also nicht null.

19 ELEKTROSTATIK

Wir haben damit eine weitere wichtige Eigenschaft der Elektrizität kennen gelernt: Elektrizität sitzt immer auf irgendwelchen Teilchen. Neben Protonen und Elektronen gibt es noch weitere Teilchen, die Elektrizität tragen: Positronen, Myonen, Antiprotonen und andere. Diese kommen unter normalen Bedingungen nicht vor. Man kann sie aber künstlich erzeugen. Sie haben allerdings nur eine sehr kurze Lebensdauer.

Von Teilchen, auf denen Elektrizität sitzt, sagt man, sie seien elektrisch geladen. Es hat sich daher eingebürgert, die Elektrizität elektrische Ladung zu nennen. Elektrisch geladene Teilchen, also Elektronen, Protonen, Ionen usw., nennt man Ladungsträger.

> Elektrische Ladung (Elektrizität) sitzt immer auf Teilchen, den Ladungsträgern.

19.2 Ladungsstrom und Ladungsträgerstrom

Wir können nun verstehen, worin sich elektrische Leiter von Nichtleitern unterscheiden: Leiter sind Stoffe, die bewegliche Ladungsträger enthalten; in Nichtleitern sind alle Ladungsträger unbeweglich. Welches die beweglichen Ladungsträger in einem elektrischen Leiter sind, ist von Fall zu Fall verschieden. In manchen Leitern bewegen sich nur positive, in manchen nur negative und in wieder anderen sowohl positive als auch negative Ladungsträger.

In Metallen sind die beweglichen Ladungsträger Elektronen. Allerdings können sich längst nicht alle Elektronen der Metallatome bewegen, sondern pro Atom gerade nur ein einziges. In Säuren, Basen und Salzlösungen gibt es keine beweglichen Elektronen. Hier kommt die elektrische Leitfähigkeit durch die Beweglichkeit von Ionen zustande. Da es sowohl positive als auch negative Ionen gibt, haben wir hier Ladungsträger mit Ladungen beiderlei Vorzeichens.

Fließt in einem elektrischen Stromkreis ein elektrischer Strom, so schieben sich die beweglichen Ladungsträger an dem entgegengesetzt geladenen Rest vorbei, sodass der Stromkreis überall neutral bleibt: Alle Leitungen, Energiequellen und Energieempfänger bleiben ungeladen.

Wir sehen, dass ein elektrischer Strom auf verschiedene Arten zustande kommen kann. In allen drei Teilbildern von Abb. 19.1 haben wir einen elektrischen Strom von 2 A, der von links nach rechts fließt. In Teil (a) der Abbildung kommt er dadurch zustande, dass sich positiv geladene Träger von links nach rechts bewegen, in (b) fließen negative Ladungsträger von rechts nach links. In Teil (c) bewegen sich gleichzeitig positive Ladungsträger nach rechts und negative nach links; beide Ladungsträgersorten tragen zum Gesamtstrom bei.

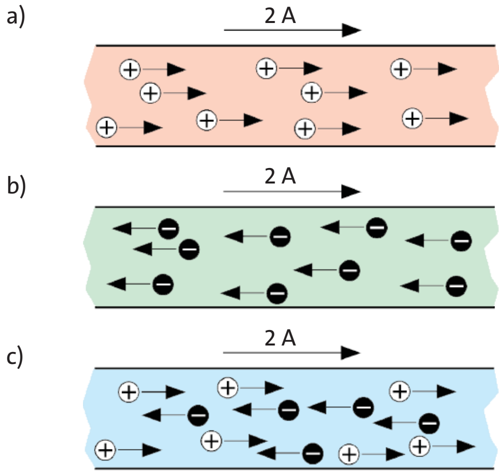


Abb. 19.1 Ein nach rechts fließender elektrischer Strom kommt zustande durch Ladungsträger, die sich (a) nach rechts, (b) nach links und (c) in beide Richtungen bewegen.

Es wird dich überraschen, wie langsam sich die Ladungsträger in einem Leiter bewegen: Fließt in einem Kupferdraht von 1 mm^2 Querschnitt ein elektrischer Strom von 1 A, so beträgt die Geschwindigkeit der beweglichen Ladungsträger (der beweglichen Elektronen) 0,07 mm/s.

Man kann die Bewegung der Ladungsträger sogar sichtbar machen. Man lässt dazu einen elektrischen Strom durch eine Salzlösung fließen, Abb. 19.2. In einer flachen Rinne befindet sich auf der linken Seite eine Lösung von Kaliumnitrat, auf der rechten von Kaliumpermanganat. Die linke Lösung ist klar und durchsichtig, die rechte violett. Die Färbung der Kaliumpermanganat-

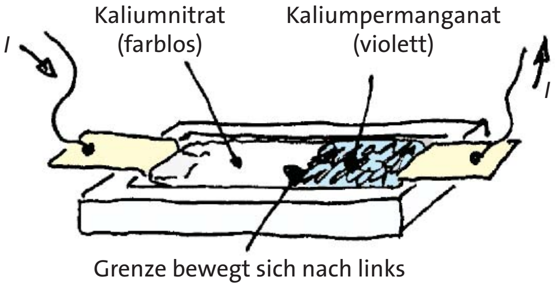


Abb. 19.2 Fließt durch die Lösung ein elektrischer Strom, so verschiebt sich die Grenze zwischen der violetten Kaliumpermanganatlösung und der farblosen Kaliumnitratlösung.

lösung kommt durch die negativen Permanganationen zustande. Wenn nun ein elektrischer Strom fließt, bewegen sich alle Ionen, auch die Permanganationen. Die Bewegung der Permanganationen hat zur Folge, dass sich die Grenze zwischen dem violetten und dem farblosen Gebiet verschiebt, und das kann man mit bloßem Auge gut erkennen. Fließt der elektrische Strom (in Abb. 19.2) von links nach rechts, so bewegen sich die violetten Ionen nach links, fließt der elektrische Strom nach links, so bewegen sie sich nach rechts.

Aufgaben

1. In einer Salzlösung, in die zwei Elektroden eingetaucht sind, fließen positive Ionen von links nach rechts. Sie transportieren 0,5 Coulomb pro Sekunde. Gleichzeitig fließen negative Ionen von rechts nach links. Sie bringen pro Sekunde minus 0,3 Coulomb von rechts nach links. In welche Richtung fließt der elektrische Strom? Welche Stärke hat er?
2. In einem Kupferdraht fließt ein elektrischer Strom von 2 A. Wie viele Elektronen bewegen sich pro Sekunde durch einen Querschnitt der Leitung?

19.3 Die Anhäufung von elektrischer Ladung

Unser ursprüngliches Anliegen war es, etwas über die Eigenschaften der Elektrizität zu erfahren. Wir haben uns dann aber klar gemacht, warum ein normaler Stromkreis überall elektrisch neutral ist, warum man also von der elektrischen Ladung normalerweise nichts merken kann. Wir wollen nun versuchen, die Neutralität eines elektrischen Leiters zu stören; wir wollen versuchen, Ladung auf ihm anzuhäufen, sodass seine Gesamtladung von null verschieden ist. Wir werden sehen, dass das recht schwierig ist.

Um das Problem, das uns dabei begegnet, besser zu verstehen, betrachten wir Abb. 19.3. Der linke Behälter ist mit Luft unter Normaldruck gefüllt. Wir möchten nun die Luftmenge in diesem Behälter vergrößern. Dazu drücken wir mit einer Pumpe Luft von außen in den Behälter hinein. Der Druck nimmt bei diesem Vorgang zu. Der rechte Behälter in Abb. 19.3 ist mit Wasser gefüllt, und wir möchten die Wassermenge in diesem Behälter vergrößern. Das geht aber längst nicht so leicht wie im Fall der Luft. Auch mit einer Pumpe, die einen sehr hohen Druck erzeugen kann, lässt sich die Wassermenge nur sehr wenig vergrößern. Das liegt daran, dass sich Wasser nicht so leicht zusammendrücken lässt wie Luft.

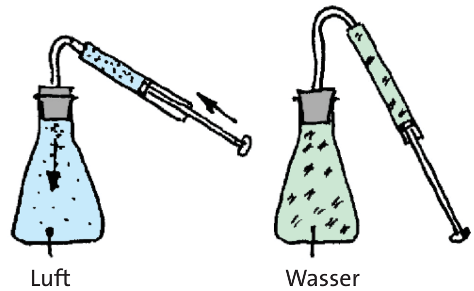


Abb. 19.3 Die Luftmenge im linken Behälter lässt sich leicht verändern, die Wassermenge im rechten nur sehr schwer.

Mit der Elektrizität verhält es sich ähnlich wie mit dem Wasser: Es ist sehr schwer, in einem Gegenstand eine Abweichung von der Normalmenge an Elektrizität, nämlich 0 Coulomb, zu erzeugen.

Wie würden wir es denn überhaupt anstellen, Elektrizität in einem Gegenstand anzuhäufen? Mit einer „Elektrizitätspumpe" natürlich, d. h. mit einer Batterie oder einem Netzgerät. Abb. 19.4 zeigt einen Versuch, der fehlschlägt: Der Plusanschluss einer Batterie ist mit einem Kabel verbunden, der Minusanschluss mit der Erde. Die Batterie sollte nun Elektrizität aus der Erde herausziehen und in das Kabel hineindrücken. Das Kabel sollte sich elektrisch aufladen und auch

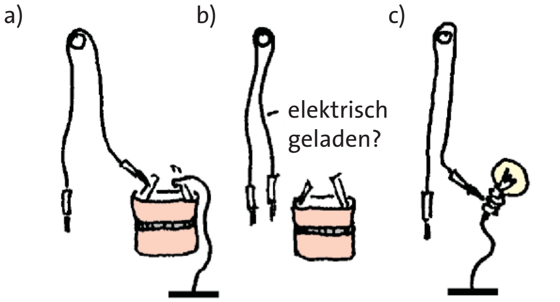


Abb. 19.4 (a) Die Batterie pumpt Elektrizität aus der Erde in das Kabel. (b) Das Kabel ist elektrisch geladen. (c) Das Lämpchen leuchtet nicht auf, weil die Ladung des Kabels viel zu gering ist.

geladen bleiben, wenn man es von der Batterie löst. Berührt man es dann mit dem einen Anschluss eines Lämpchens, dessen anderer Anschluss geerdet ist, so sollte das Lämpchen aufleuchten, denn die angehäufte Elektrizität sollte über das Lämpchen zurück in die Erde fließen. Das Lämpchen leuchtet aber nicht auf. Warum nicht? Weil die Elektrizitätsmenge, die wir auf das Kabel gepumpt haben, viel zu klein ist.

Um eine Ladungsanhäufung auf dem Kabel nachzuweisen, müssen wir das Experiment in dreierlei Hinsicht verbessern:

(1) Wir benutzen eine „Elektrizitätspumpe, die viel stärker drückt", d. h. ein Netzgerät, das eine viel höhere Spannung erzeugt. In Frage kommt ein gewöhnliches Hochspannungsnetzgerät (mit einem Transformator) oder ein Bandgenerator, Abb. 19.5. Der Bandgenerator erzeugt Spannungen bis zu etwa 50 kV.

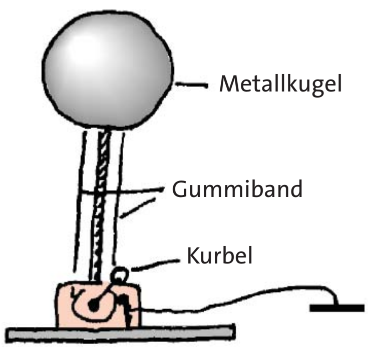


Abb. 19.5 Bandgenerator

(2) Zum Nachweis der Ladung des Kabels benutzen wir ein Gerät, das empfindlicher ist, das auf kleinere Ladungsmengen reagiert als das Glühlämpchen: eine Glimmlampe. Die Glimmlampe hat für unseren Versuch den zusätzlichen Vorteil, dass man erkennt, in welcher Richtung der Strom durch sie hindurchfließt: Sie leuchtet immer an der Seite auf, die auf dem niedrigeren Potenzial liegt.

(3) Wir hängen das Kabel über Isolatoren. Die normale Plastikisolation des Kabels ist nämlich zu schlecht, die angehäufte Elektrizität könnte über diese Isolierung und über den Tisch in die Erde abfließen.

Nachdem wir diese Maßnahmen getroffen haben, gelingt unser Versuch der Ladungsanhäufung. Je nachdem, welchen der beiden Anschlüsse des Hochspannungsnetzgerätes man erdet, erhöht oder vermindert man die Elektrizitätsmenge des Kabels. Wird der Minusanschluss des Netzgerätes geerdet, Abb. 19.6, so wird das Kabel positiv geladen. Da die beweglichen Ladungsträger des Kabels Elektronen sind, bedeutet das, dass dem Kabel Elektronen fehlen. Es hat weniger Elektronen als im ungeladenen Zustand. Wird der Plusanschluss geerdet und der Minusanschluss mit dem Kabel verbunden, so wird das Kabel negativ. Es hat einen Elektronenüberschuss.

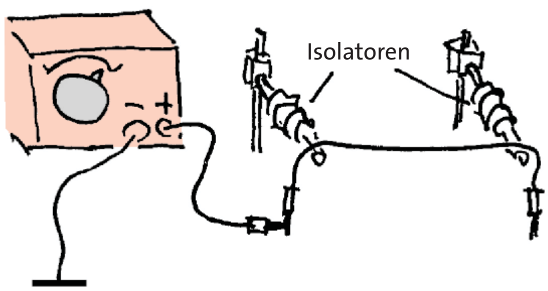


Abb. 19.6 Das Kabel ist positiv geladen, es herrscht Elektronenmangel.

Die Ladungsmenge, die wir im Kabel anhäufen, ist umso größer, je höher das Potenzial ist, auf das wir das Kabel bringen. Ein hohes positives Potenzial ist mit einer (relativ) großen positiven Ladungsmenge verbunden, ein hohes negatives Potenzial mit einer (relativ) großen negativen Ladungsmenge. Wir fassen dieses Ergebnis zusammen:

> Je höher das elektrische Potenzial eines Körpers ist, desto mehr elektrische Ladung enthält er.

Und es gilt auch die Umkehrung:

> Je größer die elektrische Ladung ist, die auf einem Körper sitzt, desto höher ist das elektrische Potenzial des Körpers.

19.4 Das elektrische Feld

Wir haben es nun geschafft, Ladung anzuhäufen und die angehäufte Ladung auch nachzuweisen; wir haben aber noch keine besonderen Eigenschaften der elektrischen Ladung bemerkt. Um die Eigenschaften der Elektrizität zu untersuchen, führen wir das in Abb. 19.7 skizzierte Experiment aus. Zwei hohle Metallkugeln A und B werden an das Hochspannungsnetzgerät angeschlossen. Kugel B ist sehr leicht. Sie ist an einem dünnen Draht aufgehängt, sodass sie sich bewegen kann. Schaltet man nun das Netzgerät ein, sodass sich die eine Kugel positiv, die andere negativ auflädt, so wird B zu A hingezogen. Laden wir die vorher positive Kugel negativ und die vorher negative positiv auf, so ändert sich nichts: B wird wieder zu A hingezogen.

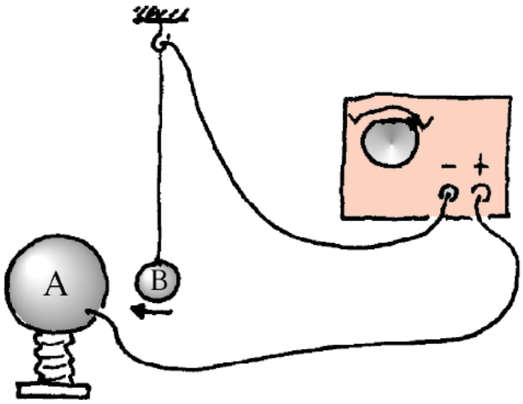


Abb. 19.7 Durch das elektrische Feld wird Kugel B zu Kugel A hingezogen.

Wir schließen nun die Kugeln so an das Netzgerät an, dass ihre Ladungen dasselbe Vorzeichen haben, Abb. 19.8. Jetzt wird B von A weggedrückt. Dabei ist es egal, ob beide Kugeln positiv oder beide negativ geladen sind.

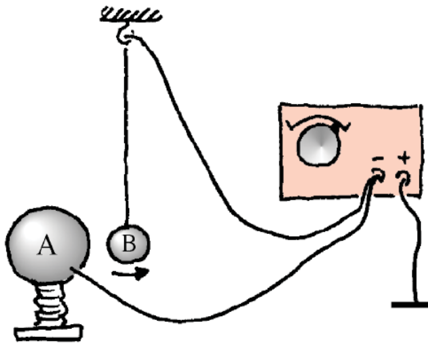


Abb. 19.8 Durch das elektrische Feld wird Kugel B von Kugel A weggedrückt.

Aus der Tatsache, dass die eine Kugel zur anderen hingezogen wird, schließen wir, dass sich zwischen den Kugeln eine Verbindung befindet.

Man nennt diese Verbindung elektrisches Feld.

> Elektrisch geladene Gegenstände sind von einem elektrischen Feld umgeben. Haben die Ladungen von zwei Gegenständen dasselbe Vorzeichen, so drückt das Feld die Gegenstände voneinander weg, haben sie verschiedene Vorzeichen, so zieht sie das Feld aufeinander zu.

Wir machen schließlich ein Experiment, das noch einfacher ist als die vorangehenden, Abb. 19.9: Nur die feststehende Kugel A wird elektrisch gela-

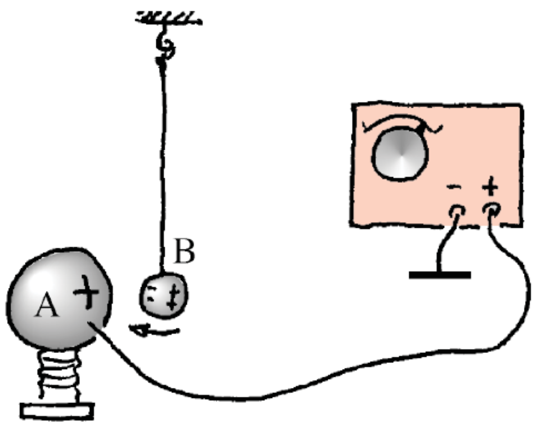


Abb. 19.9 Die beweglichen Ladungsträger auf B werden durch das elektrische Feld verschoben. An der Oberfläche von B bilden sich elektrisch geladene Bereiche.

19 ELEKTROSTATIK

den, Kugel B wird einfach isoliert aufgehängt. Überraschenderweise wird B auch diesmal zu A hingezogen. Dabei ist es egal, ob A positiv oder negativ geladen ist. Wie ist das zu erklären? Da die bewegliche Kugel nicht ans Netzgerät angeschlossen ist, sollte an ihr ja auch kein Feld hängen.

Wir finden die Erklärung, wenn wir uns an eine ähnliche Erscheinung beim Magnetismus erinnern: Ein Stück Weicheisen, d. h., ein zunächst unmagnetischer Gegenstand, wird zu einem Magnetpol hingezogen, und zwar sowohl zu einem Nordpol als auch zu einem Südpol. Hier war die Erklärung so: Das Weicheisen bildet selbst Pole, sobald es in die Nähe eines Magnetpols kommt. In der Nähe eines Nordpols bildet es auf der diesem Pol zugewandten Seite einen Südpol und auf der entgegengesetzten Seite einen Nordpol, Abb. 19.10.

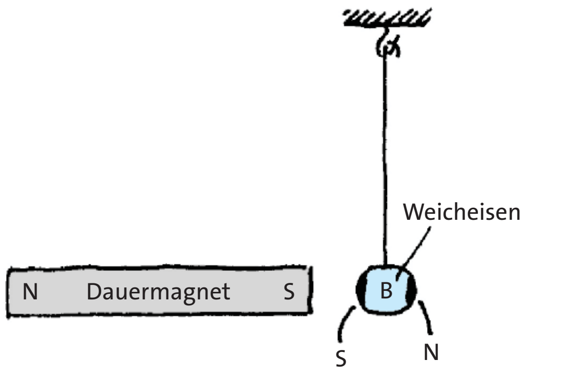


Abb. 19.10 B wird durch das magnetische Feld magnetisiert. An der Oberfläche von B bilden sich Magnetpole.

Ganz ähnlich ist es bei unserem letzten Experiment. Das elektrische Feld zieht an den Ladungsträgern von B und verschiebt sie etwas, sodass sich B auf der einen Seite positiv und auf der gegenüberliegenden negativ lädt. Die Gesamtladung von B bleibt dabei null. Ist A positiv geladen, so wird B auf der A zugewandten Seite negativ und auf der A abgewandten Seite positiv. Da die negative Seite von B einen geringeren Abstand von A hat als die positive, wird die Kugel B zu A hingezogen. Ist A negativ, so verschieben sich die Ladungen auf B in die andere Richtung, und wieder haben die Ladungen von A und der A zugewandten Seite von B entgegengesetztes Vorzeichen, sodass B zu A hingezogen wird.

Diesen Vorgang der Ladungsverschiebung unter dem Einfluss des elektrischen Feldes eines anderen Körpers nennt man Influenz.

Als Nachweis dafür, dass ein Gegenstand elektrisch geladen ist, stand uns früher nur das Glimmlämpchen zur Verfügung. Ein anderes Nachweisgerät für die Elektrizität ist das Elektroskop. Wir können jetzt verstehen, wie es funktioniert.

Im Innern des Ringes, Abb. 19.11, befindet sich ein senkrechter Stab. Der Stab ist vom Ring elektrisch isoliert. An diesem Stab befindet sich drehbar gelagert ein weiterer Stab. Dieser drehbare Stab ist sehr leicht, und er ist mit dem festen Stab leitend verbunden. Beide Stäbe sind mit dem oberen Anschluss des Elektroskops elektrisch leitend verbunden. Der Ring wird geerdet.

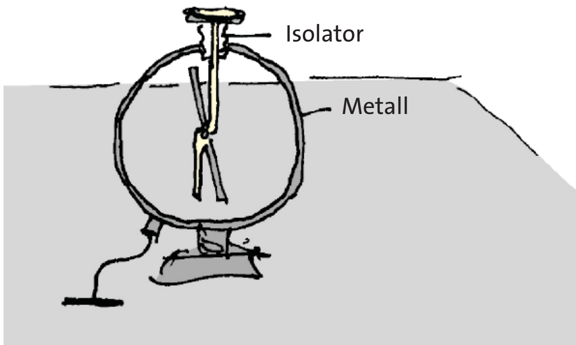


Abb. 19.11 Elektroskop. Der bewegliche Stab trägt Ladung desselben Vorzeichens wie der feste.

Wir wollen das Elektroskop benutzen, um die auf der Kugel sitzende Ladung nachzuweisen. Dazu wird der obere Anschluss des Elektroskops mit der Kugel berührt. Es fließt elektrische Ladung von der Kugel zu den beiden Stäben. Diese sind jetzt gleichartig geladen, und der drehbare Stab wird durch das elektrische Feld vom festen Stab weggedrückt. Je mehr Ladung auf dem Elektroskop sitzt, desto stärker spreizt sich der drehbare Stab vom festen weg.

Wir benutzen das Elektroskop, um in einem einfachen Versuch noch einmal die Erscheinung der Influenz zu zeigen, Abb. 19.12.

Die große Kugel wurde positiv elektrisch geladen. Wir bringen zwei kleine, neutrale Kugeln B und C in den Bereich des Feldes der großen, Abb. 19.12a. B und C berühren sich gegenseitig,

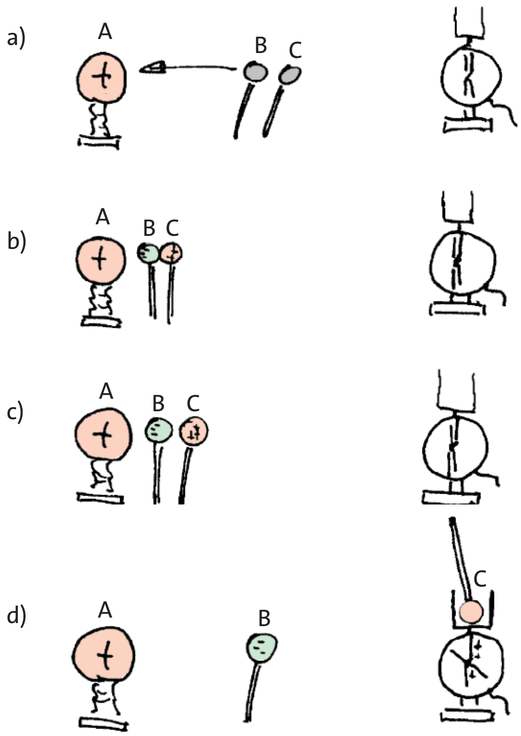


Abb. 19.12 (a) Die neutralen Kugeln B und C werden in die Nähe von A gebracht. (b) Die Ladungen auf B und C trennen sich durch Influenz. (c) Der Kontakt zwischen B und C wird unterbrochen. (d) Die Ladung von C wird mit dem Elektroskop nachgewiesen.

sie berühren aber nicht A, Abb. 19.12b. Durch das Feld von Kugel A werden Ladungen auf B und C getrennt, es findet Influenz statt. Links, d. h. auf B, häuft sich negative Ladung an. Rechts, auf Kugel C, konzentriert sich positive Ladung. Wir trennen nun B und C voneinander, und zwar noch während sie in der Nähe von A sind, Abb. 19.12c. Wir führen sie dann aus dem Bereich der großen Kugel heraus, Abb. 19.12d. Eigentlich möchten sich die Ladungen auf B und C jetzt wieder ausgleichen. Sie können es aber nicht, denn die Verbindung ist unterbrochen.

Um die Ladungen auf B und auf C nachzuweisen, benutzen wir das Elektroskop. Wir berühren das Elektroskop mit einer der beiden Kugeln, mit C zum Beispiel. Von C fließt negative Ladung auf das Elektroskop, das Elektroskop schlägt aus. Wir berühren dann das Elektroskop mit Kugel B. Jetzt fließt positive Elektrizität auf das Elektroskop und neutralisiert die negative, sodass der Ausschlag wieder zurückgeht.

Aufgaben

1. Auf Kugel B in Abb. 19.9 werden positive und negative Ladungsträger durch Influenz getrennt. Die Kugel wird vom Feld zu A hingezogen. Sobald sie aber A berührt hat, wird sie von A weggedrückt. Wie ist das zu erklären?
2. Wie könnte man zeigen, dass es sich bei dem Gebilde, das sich in der Umgebung elektrisch geladener Gegenstände befindet, nicht um ein magnetisches Feld handelt?
3. Eine leichte Metallkugel A ist zwischen zwei feststehenden Kugeln B und C aufgehängt, Abb. 19.13. Man bringt Kugel A kurz zur Berührung mit C und lässt sie dann los. Was passiert?

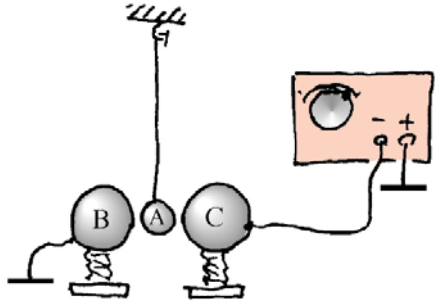


Abb. 19.13 Zu Aufgabe 3

19.5 Der Kondensator

Wir hatten Drähte und Metallkugeln elektrisch geladen. Trotz des hohen Potenzials haben wir aber nur sehr wenig Ladung anhäufen können. Wir haben noch nicht untersucht, wie die Ladungsmenge von der Größe und der Form des geladenen Körpers abhängt. Das wollen wir jetzt tun. Es ist natürlich unser Ziel, herauszufinden wie man möglichst viel Ladung speichern kann.

Unsere erste Feststellung ist, dass die Elektrizität nur auf der äußeren Oberfläche eines geladenen Körpers sitzt. Das erkennt man daran, dass man bei gleichem Potenzial auf einer vollen Kugel nicht mehr Ladung unterbringt als auf einer hohlen, Abb. 19.14. Allerdings sitzt auf einer großen Kugel mehr Ladung als auf einer kleinen. Um viel Ladung zu speichern, muss man also einen Gegenstand mit großer äußerer Oberfläche verwenden.

Es gibt aber eine noch viel wirksamere Methode, die angehäufte Ladungsmenge zu vergrößern: Man bringt den Körper, von dem man die Ladung herunternimmt, in die Nähe von dem, auf den

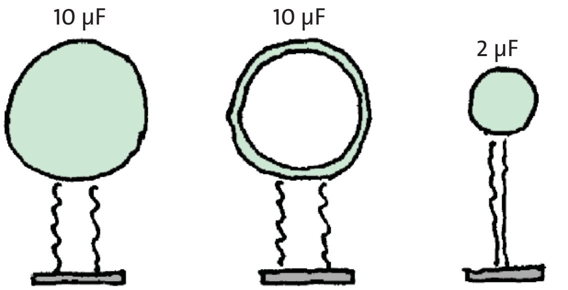


Abb. 19.14 Bei gleichem Potenzial sitzt auf einer hohlen Kugel dieselbe Elektrizitätsmenge wie auf einer gleich großen massiven Kugel, aber mehr als auf einer kleinen.

man sie drauftut. Je näher sich die beiden Körper sind, desto mehr Ladung enthalten sie bei vorgegebenem Potenzialunterschied. Den größten Effekt erzielt man, wenn die beiden Körper plattenförmig sind und man den Abstand zwischen den Platten sehr gering macht. Das Feld zieht dann die Ladungen auf den Platten aufeinander zu, sodass sie nur auf den einander zugewandten Oberflächen der beiden Platten sitzen, Abb. 19.15. Ein solches Gerät zur Speicherung elektrischer Ladung nennt man einen Kondensator.

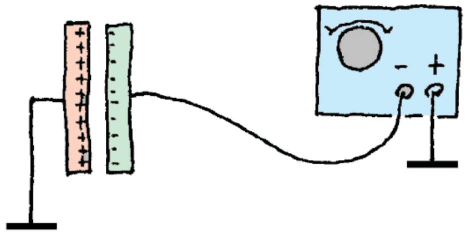


Abb. 19.15 Kondensator. Zwei Metallplatten stehen sich in sehr geringem Abstand gegenüber. Die Ladungen auf den Platten haben entgegengesetztes Vorzeichen.

Wir machen einen Versuch, der zeigt, dass das Fassungsvermögen eines Kondensator zunimmt, wenn man den Plattenabstand vermindert. Wir verwenden dazu einen Kondensator mit veränderlichem Plattenabstand. Die eine Platte, die negativ geladene zum Beispiel, wird geerdet. Wir laden den Kondensator zunächst bei großem Plattenabstand und entladen ihn dann über ein Glimmlämpchen. Wir wiederholen diesen Versuch mehrere Male, wobei wir die Spannung am Netzgerät jedes Mal etwas vermindern, Abb. 19.16. Schließlich ist die Ladung des Kondensators so

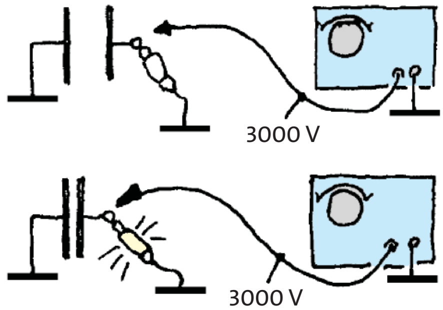


Abb. 19.16 Eine Verminderung des Plattenabstandes bewirkt eine Zunahme der Ladung auf den Platten.

klein, dass kein Aufleuchten des Lämpchens mehr zu erkennen ist. Wir schieben nun die beiden Platten auf einen sehr geringen Abstand — etwa 2 mm — zusammen, und wiederholen den Versuch noch einmal mit der zuletzt eingestellten, niedrigen Spannung. Das Glimmlämpchen leuchtet wieder kräftig auf. Bei gleicher Spannung befindet sich also bei kleinem Plattenabstand mehr Ladung auf den Platten als bei großem Abstand.

> Je kleiner der Plattenabstand eines Kondensators ist, desto größer ist die gespeicherte Ladungsmenge.

In technischen Kondensatoren ist der Plattenabstand noch viel geringer und die Plattenfläche viel größer als in unserem Experimentierkondensator. Man erreicht das zum Beispiel dadurch, dass man zwei sehr dünne Schichten aus Aluminiumpapier, das von einer ebenfalls sehr dünnen Schicht Isoliermaterial überzogen ist, zu einem Zylinder aufwickelt, Abb. 19.17.

Die Ladung auf einem technischen Kondensator kann so groß sein, dass ihr Nachweis ganz ein-

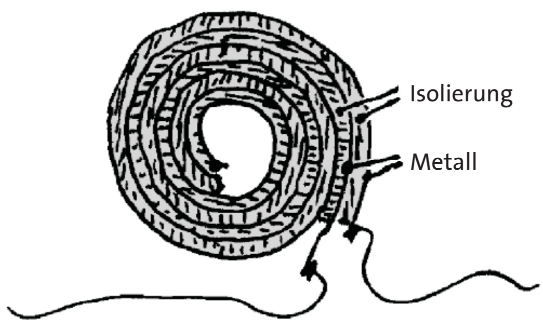


Abb. 19.17 Metallpapierkondensator im Querschnitt

fach wird. Wir bauen die auf Abb. 19.18 dargestellte Schaltung auf (du siehst hier auch gleich das technische Symbol des Kondensators). Der Kondensator wird geladen, indem er kurz an ein 6-V-Netzgerät angeschlossen wird. Er wird dann mit einem kleinen Elektromotor verbunden. Der Motor läuft ein paar Sekunden lang.

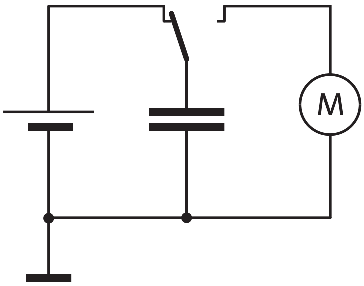


Abb. 19.18 Der Kondensator als Energiespeicher

Wir erkennen an diesem Experiment auch, wozu ein Kondensator verwendet werden kann: zum Speichern von Energie. Beim Laden der Platten mit Elektrizität entsteht zwischen den Platten ein elektrisches Feld, und dieses enthält, genauso wie das magnetische Feld, Energie. Beim Laden geht Energie vom Netzgerät in den Kondensator hinein. Beim Entladen gibt sie der Kondensator an den Motor ab.

Der Kondensator kann damit eine ähnliche Funktion erfüllen wie der Akkumulator: Er speichert Energie. Er bekommt diese Energie beim Laden mit dem Energieträger Elektrizität, und er gibt sie beim Entladen mit demselben Energieträger wieder ab. Er unterscheidet sich vom Akku in zwei Eigenschaften: Man kann die Energie in den Kondensator viel schneller hineinbringen und viel schneller herausholen als beim Akkumulator. Dafür ist aber das Fassungsvermögen des Kondensators (für die Energie) viel kleiner als die des Akkumulators.

Kondensatoren sind in allen elektronischen Geräten zu finden.

19.6 Die Kapazität

Wir wollen untersuchen, wie viel elektrische Ladung sich auf den Platten eines Kondensators befindet. Beim Laden nimmt die Spannung zwischen den Platten zu. Wir laden den Kondensator so lange, bis die Spannung den höchsten zulässigen Wert erreicht hat. (Dieser Wert ist auf den Kondensator aufgedruckt. Wenn man ihn überschreitet, kann es zu einem Durchschlag zwischen den Platten kommen.)

Wir laden den Kondensator mithilfe eines Netzgeräts, das einen elektrischen Strom konstanter Stärke liefert. Um die gespeicherte Elektrizitätsmenge zu erhalten, benutzen wir die Beziehung

$$Q = I \cdot t.$$

Wir kennen die Stärke I des Ladestroms und messen die zum Laden benötigte Zeit t. Wir können damit die Elektrizitätsmenge Q, die sich am Ende des Ladevorgangs auf den Platten befindet, berechnen. Genauer gesagt: Q stellt die Ladung der positiven Platte dar. Auf der negativen sitzt die Ladung $-Q$.

Beispiel

Der Kondensator wird geladen, bis die Spannung 6 Volt beträgt. Die elektrische Stromstärke beim Laden beträgt 10 mA. Das Laden dauert 6 Sekunden. Die Elektrizitätsmenge auf den Platten ergibt sich zu

$$Q = I \cdot t = 10\ \text{mA} \cdot 6\ \text{s} = 60\ \text{mC}.$$

Wir entladen dann den Kondensator und laden ihn noch einmal, aber nur auf den halben Wert

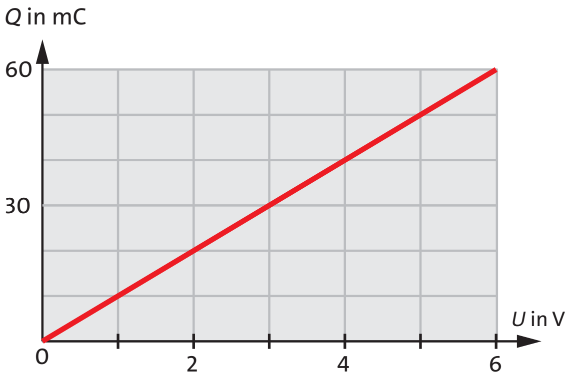


Abb. 19.19 Die Ladung auf den Platten eines Kondensators als Funktion der Spannung zwischen den Platten

der Spannung. Wir stellen fest, dass wir hierzu auch nur die halbe Zeit brauchen. Auf den Platten sitzt daher auch nur halb so viel elektrische Ladung. Wir schließen, dass die Elektrizitätsmenge auf den Platten proportional zur elektrischen Spannung zwischen den Platten ist, Abb. 19.19:

$$Q \sim U.$$

Wir können diese Beziehung auch folgendermaßen erhalten. Wir tragen während des Ladevorgangs in einem Diagramm die Ladung auf den Platten über der Zeit auf. Da der Ladestrom konstant ist, nimmt die Ladungsmenge gleichmäßig mit der Zeit zu: Q ist eine lineare Funktion der Zeit, Abb. 19.20a. Wir zeichnen außerdem während des Ladevorgangs die Spannung zwischen den Kondensatorplatten als Funktion der Zeit auf: Es ergibt sich wieder eine lineare Funktion, Abb. 19.20b. Der Vergleich von Abb. 19.20a mit Abb. 19.20b zeigt, dass U auch eine lineare Funktion von Q ist.

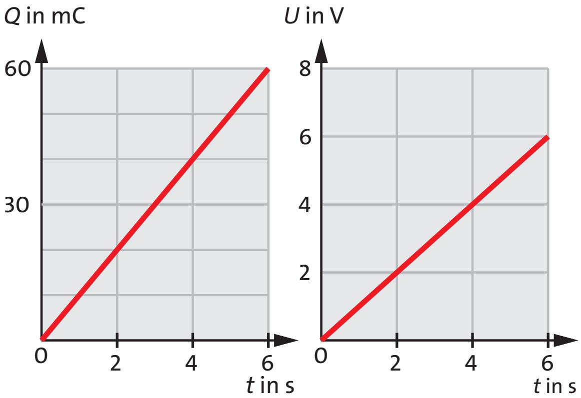


Abb. 19.20 Ladung und Spannung beim Laden eines Kondensators als Funktion der Zeit

Dass $Q \sim U$ ist, ist gleichbedeutend damit, dass der Quotient Q/U konstant ist. Man nennt diesen Quotienten die Kapazität C des Kondensators:

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Ist die Kapazität eines Kondensators A doppelt so groß wie die eines anderen Kondensators B, so befindet sich, bei vorgegebener Spannung, auf A doppelt so viel Ladung wie auf B.

Der Wert der Kapazität ist auf technische Kondensatoren aufgedruckt. Aus der oben stehenden Gleichung folgt, dass die Maßeinheit der Kapazität Coulomb/Volt ist. Für diese Einheit benutzt man die Abkürzung Farad (F). Es gilt also

$$1\ \mathrm{C/V} = 1\ \mathrm{F}.$$

Ein Farad ist eine sehr große Einheit. Die Kapazitäten technischer Kondensatoren liegen gewöhnlich im Bereich von Nanofarad bis Millifarad.

Beispiel

In unserem Beispiel betrug die elektrische Ladung des Kondensators 60 mC, als zwischen den Kondensatorplatten eine Spannung von 6 Volt herrschte. Daraus ergibt sich die Kapazität des Kondensators:

$$C = Q/U = 60\ \mathrm{mC}/6\ \mathrm{V} = 10\ \mathrm{mF}.$$

> Die Spannung U zwischen den Platten eines Kondensators ist proportional zur elektrischen Ladung Q, die auf den Platten sitzt. Den Quotienten Q/U nennt man die Kapazität des Kondensators.

Aufgaben

1. Ein Kondensator wird mit einer konstanten elektrischen Stromstärke von 2 mA geladen, bis die Spannung zwischen seinen Platten 240 Volt beträgt. Das Laden dauert 2 Minuten. (a) Wie viel elektrische Ladung sitzt am Ende des Ladevorgangs auf den Platten? (b) Welche Kapazität hat der Kondensator?
2. Zwischen den Platten eines 80-μF-Kondensators liegt eine Spannung von 150 Volt. Welche Elektrizitätsmenge sitzt auf den Platten?

19.7 Die Luftelektrizität

Hält man ein geerdetes Kabel in die Nähe der geladenen Kugel eines Bandgenerators, so „springt ein Funke über“. Genauer gesagt passiert das Folgende: In der Luft befindet sich immer eine geringe Menge von Ionen. Diese werden in dem starken Feld zwischen dem Ende des geerdeten Kabels und der Kugel so stark beschleunigt, dass sie, wenn sie mit Molekülen aus der Luft zusammenstoßen, diese ionisieren. Diese neuen Ionen ionisieren weitere Moleküle usw. So bildet sich ein „Schlauch" aus ionisierter Luft, und dieser ist leitfähig, und er leuchtet. Die Kugel entlädt sich über ihn.

Viel eindrucksvoller sieht man dieselbe Erscheinung beim Gewitter, in Form des Blitzes. Auch hier wird die Luft ionisiert, und zwar zwischen der Erde und einer geladenen Wolke. Die Spannung ist hier allerdings sehr viel höher als bei unserem Bandgenerator, nämlich viele Millionen Volt.

Die Elektrizität fließt nun in der Atmosphäre in einem sehr merkwürdigen Stromkreis. Um diesen Stromkreis zu verstehen, und um zu verstehen, welche Vorgänge bei einem Gewitter ablaufen, müssen wir uns zunächst mit der Atmosphäre bei schönem Wetter befassen.

Die elektrische Leitfähigkeit der Luft ist in Bodennähe sehr gering. Sie wächst aber mit zunehmender Höhe, denn die Anzahl und die Beweglichkeit der Ionen nimmt nach oben hin stark zu. Man kann etwas vereinfachend sagen, dass die Atmosphäre in einer Höhe oberhalb von etwa 50 km eine gut leitende Schicht bildet. Man nennt diesen Teil der Atmosphäre die Ionosphäre. (Der Luftdruck beträgt hier weniger als 1/1000 des Drucks am Erdboden.) Die Ionosphäre und die Erdoberfläche bilden damit sozusagen die beiden Platten eines riesigen Kondensators.

Die Ionosphäre befindet sich nun ständig auf einem Potenzial von etwa 300 000 Volt. Zwischen ihr und der Erdoberfläche liegt die schlecht leitende Luftschicht, die insgesamt einen Widerstand von etwa 200 Ω hat. Die Potenzialdifferenz zwischen der Ionosphäre und der Erdoberfläche führt zu einem vertikal gerichteten elektrischen Strom von 1500 A, Abb. 19.21.

Von diesem Schönwetterstrom merkt man aber fast nichts, da er sich auf die ganze Erde verteilt. Nun hätte dieser Strom zur Folge, dass sich die Ionosphäre recht schnell entlädt, die Spannung wäre in nicht mehr als einer halben Stunde zusammengebrochen. Dafür, dass sie nicht zusammenbricht, sorgen die Gewitterwolken.

Eine Gewitterwolke kann man sich vorstellen als eine riesige Elektrizitätspumpe, eine Art Batterie oder Bandgenerator. Wie sie funktioniert, werden wir gleich noch sehen. Im Augenblick wollen wir nur betrachten, wie sie in unseren atmosphärischen Stromkreis eingebaut ist, Abb. 19.22. Die Gewitterwolke pumpt Elektrizität von unten nach oben. An ihrer Unterseite entsteht ein stark negatives und an ihrer Oberseite ein stark positives Potenzial.

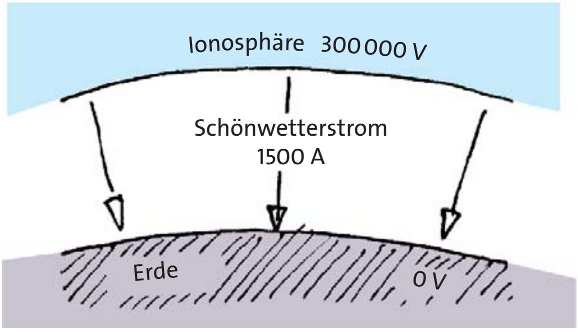


Abb. 19.21 Das elektrische Potenzial der Ionosphäre ist um etwa 300 000 Volt höher als das der Erde. Von der Iono sphäre zur Erde fließt ein Schönwetterstrom von etwa 1500 A.

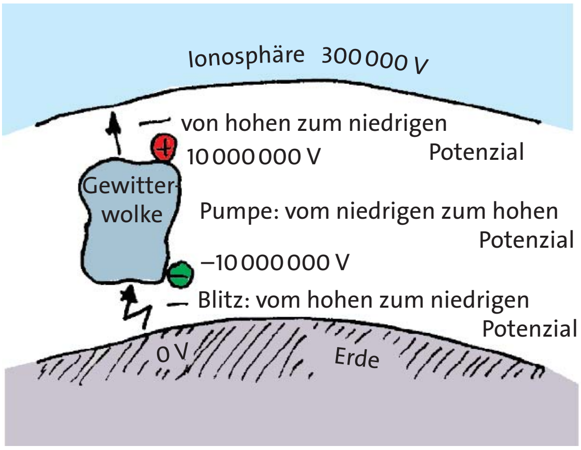


Abb. 19.22 Gewitterwolken pumpen ständig Elektrizität von der Erde zur Ionosphäre.

Da die Luft über der Wolke recht gut leitet, fließt vom oberen „Anschluss" der Wolke ein elektrischer Strom zur Ionosphäre: vom höheren Potenzial (einige Millionen Volt) zum niedrigeren Potenzial (300 000 V).

Außerdem muss noch ein Strom von der Erde zum unteren „Anschluss" der Wolke fließen, nämlich wieder vom höheren Potenzial (0 V) zum niedrigeren (minus einige Millionen Volt). Da hier unter der Wolke die Luft aber sehr schlecht leitet, kann dieser Strom nur über Blitze fließen. Die Blitze stellen also die untere Zuleitung zu unserer Elektrizitätspumpe dar.

Wie funktioniert nun diese Pumpe selbst? Was geht in einer Gewitterwolke vor? Wassertröpfchen und Eisteilchen in einer Wolke sind elektrisch geladen. Die kleineren Teilchen tragen vorzugsweise positive, die größeren negative elektrische Ladung. Insgesamt, im Durchschnitt über alle Teilchen, ist die Wolke aber zunächst neutral. Nun laufen allerdings in einer Gewitterwolke Vorgänge ab, durch die die großen von den kleinen Teilchen getrennt werden. Damit wird auch die negative von der positiven Elektrizität getrennt, und es baut sich ein Potenzialunterschied auf.

Für die Trennung nach der Größe, und damit auch nach dem Vorzeichen der elektrischen Ladung, ist der starke Aufwind innerhalb der Wolke verantwortlich: Kleine Teilchen werden, zusammen mit ihrer elektrischen Ladung, nach oben getragen; große Tropfen Graupeln oder Hagelkörner fallen als Niederschlag nach unten. Das Potenzial der Wolke wird dabei an ihrer Oberseite stark positiv und an ihrer Unterseite stark negativ.

Das Aufladen der Ionosphäre durch die Gewitterwolken ist nun nicht ein Vorgang, der nur ab und zu einmal passiert. Man kann ja die Ionosphäre als eine einzige, zusammenhängende Kondensatorplatte betrachten, und zu deren Aufladung tragen alle Gewitterwolken auf der ganzen Erde bei. Auf der Erde sind ständig etwa 2 000 Gewitter tätig, mit zusammen etwa 100 Blitzentladungen pro Sekunde. Die Elektrizitätspumpe, die die Ionosphäre auflädt, läuft also ununterbrochen.

20 DATENTECHNIK

20.1 Verstärker

Für jede Art von Transport wird Energie gebraucht. Der Lastwagen, der Ziegelsteine von der Ziegelei zur Baustelle bringt, verbraucht Dieselkraftstoff und damit Energie. Damit Wasser durch eine Wasserleitung oder Erdöl durch eine Pipeline strömt, braucht man Pumpen und diese brauchen Energie. Wo bleibt die Energie, die für diese Transporte eingesetzt wird? Sie führt in jedem Fall dazu, dass der Transportweg etwas erwärmt wird: Es wird Entropie erzeugt. Zusammen mit dieser Entropie verteilt sich die Energie so in der Umgebung, dass man schließlich nichts mehr von ihr merkt.

Auch für den Transport von Daten ist Energie nötig. In den meisten Fällen wird diese Energie von der Datenquelle aus mitgeschickt, sie wird den Daten sozusagen als Wegzehrung mitgegeben. So tragen die Schallwellen, die ein Lautsprecher erzeugt, die elektromagnetischen Wellen, die von einer Antenne ausgehen oder das Licht, das vom Bildschirm eines Fernsehapparats kommt, außer den Daten noch Energie.

Wir können damit das graphische Symbol der Datenquelle vervollständigen, Abb. 20.1.

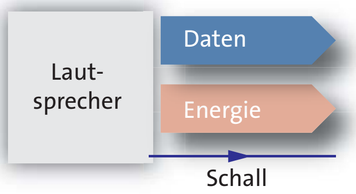


Abb. 20.1 Der Schall, der vom Lautsprecher kommt, trägt Daten und Energie.

Die Energie und die Daten haben in diesen Beispielen denselben Träger.

Bei einigen Datentransporten ist man mit der Energie besonders verschwenderisch: Die von der Quelle losgeschickte Energie verteilt sich bei ihrer Ausbreitung auf eine immer größere Fläche, Abb. 20.2. Das gilt z. B. für den Schall, der von einem Lautsprecher oder von einer sprechenden Person kommt, oder für die elektromagnetischen Wellen, die von einer Rundfunk- oder Fernsehsendeantenne ausgehen. Eine solche Verteilung der Energie im ganzen Raum ist immer dann praktisch, wenn man viele Empfänger erreichen will, ohne zu jedem einzelnen eine Leitung zu legen.

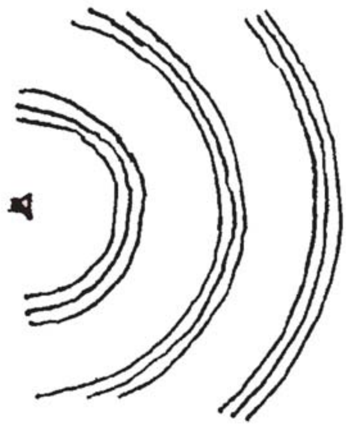


Abb. 20.2 Die von der Quelle ausgesandte Energie verteilt sich auf immer größere Flächen.

Will man dagegen nur einen einzigen Empfänger erreichen, so ist dieses Verfahren unzweckmäßig. Daher werden z. B. beim Richtfunk die elektromagnetischen Wellen gebündelt, sodass ein größerer Teil der mit den Daten abgeschickten Energie die Empfangsantenne erreicht.

Beim Datenempfänger muss immer irgendetwas „betätigt" oder „ausgelöst" werden:

- in einer Empfangsantenne müssen elektrische Ströme induziert werden;
- das Trommelfell einer hörenden Person muss in Bewegung versetzt werden;
- die Membran eines Lautsprechers muss bewegt werden.

Diese Vorgänge können aber nur dann ablaufen, wenn mit den Daten noch genügend viel Energie ankommt. Sind die Energieverluste in einer Telefonleitung zu groß oder ist der Radioempfänger vom Sender zu weit entfernt, so funktioniert die Datenübertragung nicht mehr.

Damit trotz großer Entfernung von der Quelle beim Empfänger mit den Daten genügend viel Energie ankommt, benutzt man Verstärker. Ein Verstärker hat für die Daten einen Eingang und einen Ausgang. Die Daten kommen mit wenig Energie in den Verstärker hinein, und sie verlassen ihn mit viel Energie. Der Datenstrom bekommt also neue Wegzehrung. Abb. 20.3 zeigt symbolisch einen elektrischen Verstärker: Der Datenträger am Eingang und am Ausgang ist hier die Elektrizität.

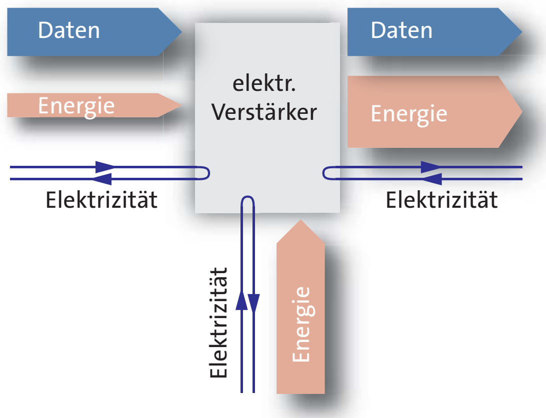


Abb. 20.3 Symbolische Darstellung eines elektrischen Verstärkers

Natürlich kann der Verstärker die zusätzliche Energie nicht aus dem Nichts erzeugen. Er braucht für die Energie noch einen zweiten Eingang. In vielen Fällen gelangt diese Energie über ein Netzkabel in den Verstärker.

> In einem Verstärker wird der Energiestrom, der einen Datenstrom begleitet, vergrößert.

Am Beispiel des elektrischen Verstärkers wollen wir uns klar machen, was ein Verstärker genau tut. Wir nehmen der Einfachheit halber an, die Daten seien binär codiert. In den Verstärker hinein läuft ein „schwaches Signal", das so aussehen könnte, wie es Abb. 20.4a zeigt. Hier ist die Energiestromstärke über der Zeit aufgetragen. Der Verstärker macht hieraus ein „starkes Signal". Es ist wichtig, dass er zu dem Energiestrom des schwachen Signals nicht einfach einen Energiestrom konstanter Stärke hinzuaddiert, wie es Abb. 20.4b zeigt. Das Ergebnis würde man immer noch ein schwaches Signal nennen, denn die Unterschiede zwischen den größeren und den kleineren Werten sind noch genauso schwer zu erkennen wie bei dem Signal von Abb. 20.4a. Der Verstärker muss vielmehr die Energiestromstärke mit einem möglichst großen Faktor multiplizieren. Das Ergebnis einer Multiplikation mit dem Faktor 8 zeigt Abb. 20.4c.

Ein Verstärker kann daher charakterisiert werden durch den Faktor, um den der Energiestrom am Ausgang stärker ist als am Eingang.

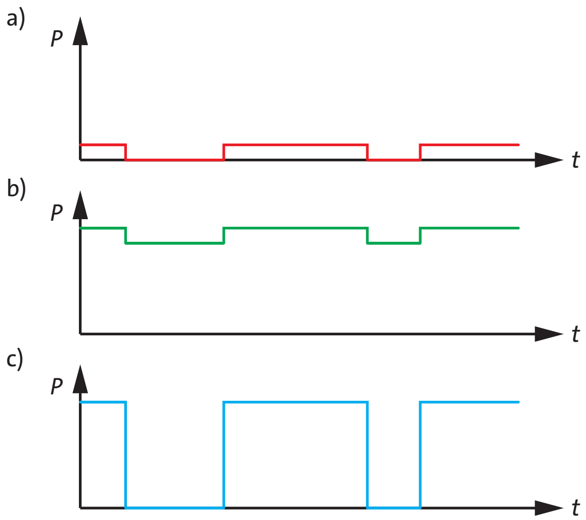


Abb. 20.4 Energiestromstärke P als Funktion der Zeit t. (a) schwaches Signal, (b) nach Addition eines Energiestroms konstanter Stärke ist das Signal immer noch schwach, (c) starkes Signal

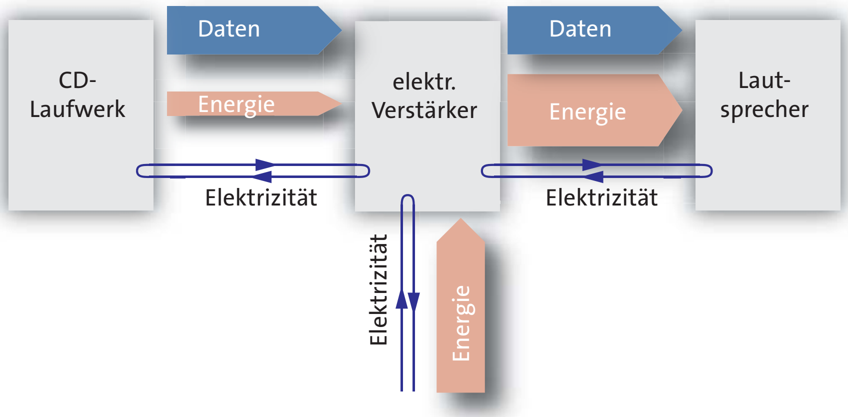


Abb. 20.5 Datenübertragung von einem CD-Laufwerk zu den Lautsprecherboxen

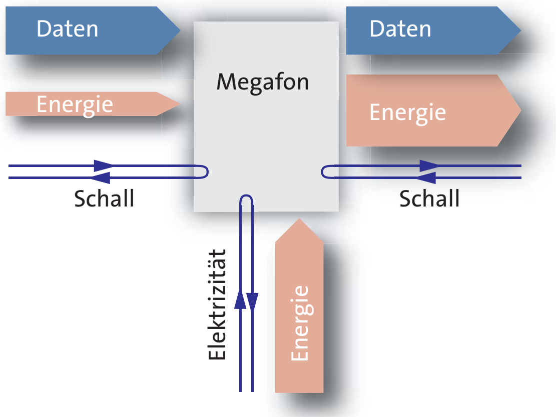


Abb. 20.6 Symbolische Darstellung eines Megafons

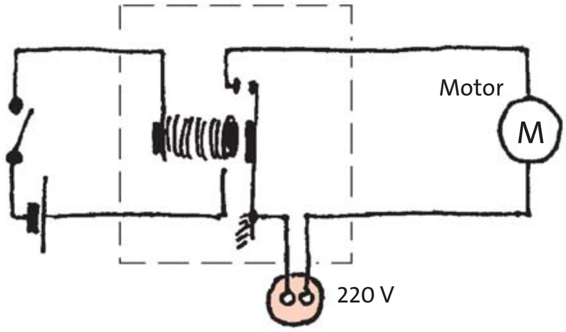


Abb. 20.7 Das Relais ist ein Verstärker für Binärzeichen.

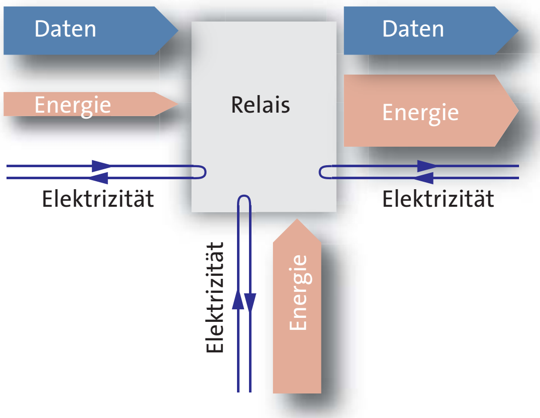


Abb. 20.8 Symbolische Darstellung eines Relais

Abb. 20.5 zeigt den Datenfluss von einem CD-Laufwerk zu den Lautsprecherboxen. Das Laufwerk liefert einen Energiestrom von etwa 0,1 μW. Die Lautsprecherboxen brauchen aber 10 W. Daher befindet sich zwischen Laufwerk und Boxen ein Verstärker. Der Verstärkungsfaktor eines typischen Hifi-Verstärkers beträgt 10^8.

Die Energiestromstärke der elektrischen Signale, die von einer Radioantenne kommen, beträgt sogar nur etwa 1 pW (ein Millionstel von einem Millionstel Watt). Der Verstärkungsfaktor bei Radioempfang muss daher etwa 10^{13} betragen.

Abb. 20.6 zeigt das Flussbild eines Megafons. Die Daten gelangen mit dem Träger Schall ins Megafon hinein und kommen mit demselben Träger heraus, aber der Schall am Ausgang trägt viel mehr Energie als der am Eingang.

Einen sehr einfachen Verstärker für Binärzeichen stellt ein Relais dar, Abb. 20.7. Abb. 20.8 zeigt das entsprechende Flussbild.

Dieser Verstärker lässt sich leicht in einen Verstärker für optische Binärzeichen verwandeln, Abb. 20.9 und Abb. 20.10.

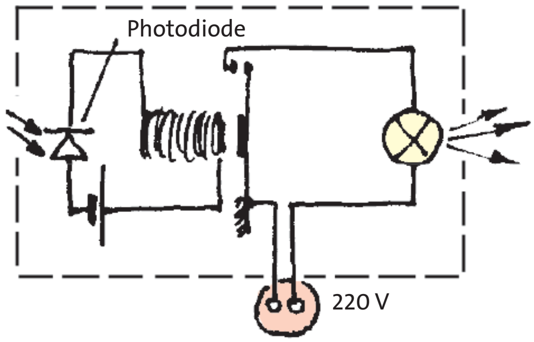


Abb. 20.9 Verstärker für optische Binärzeichen

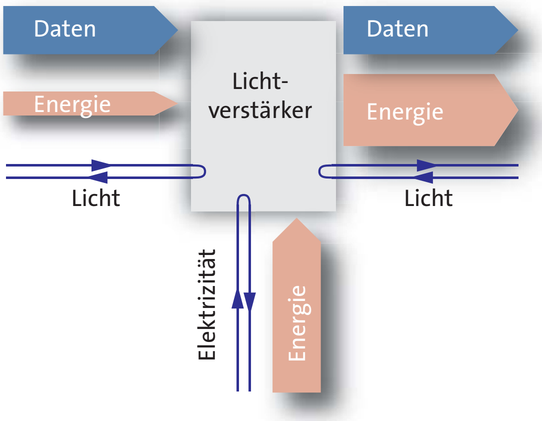


Abb. 20.10 Symbolische Darstellung des Verstärkers von Abb. 20.9

Das Fernsehprogramm kommt oft auf einem komplizierten Weg zum Zuschauer. Ein Fernsehsender hat eine Reichweite von nur etwa 50 km. Um ein Fernsehprogramm über eine größere Entfernung zu leiten, braucht man Zwischenstationen mit Verstärkern. Das sind die sogenannten Fernmeldetürme, die man auf manchen Bergen stehen sieht. Die Daten werden vom einen zum nächsten mit gebündelten elektromagnetischen Wellen übertragen. Auf jedem Turm befindet sich eine Empfangs- und eine Sendeantenne. Zwischen Empfang und erneutem Senden werden die Signale verstärkt, Abb. 20.11. Dieselben Stationen dienen auch dazu, Telefongespräche über größere Entfernungen zu übertragen.

Die Türme müssen in Sichtweite voneinander stehen. Wenn über größere Entfernungen kein Turm gebaut werden kann, z. B. bei der Übertragung über den Ozean, wird die Station in einem Satelliten untergebracht.

Fernmeldetürme haben auch noch Sendeantennen für nicht gebündelte Wellen: So wird das Programm zu den einzelnen Fernsehapparaten übermittelt.

Zu diesem letzten Schritt der Verteilung, bei dem jeder Apparat die Daten über seine Empfangsantenne erhält, gibt es aber eine Konkurrenz: die Verteilung über Kabel. Beim Kabelfernsehen ist der Empfang weniger gestört, und man kann zwischen viel mehr Programmen wählen. Drahtlos kann man nicht so hohe Datenstromstärken erreichen.

Wovon hängt es ab, wie viel Energie ein Datenempfänger braucht? Wir hatten gesagt, im Empfänger muss irgendetwas ausgelöst werden. Aber könnte man nicht auch mit sehr, sehr wenig Energie etwas auslösen? Im Prinzip ja, allerdings tritt hier eine neue Schwierigkeit auf.

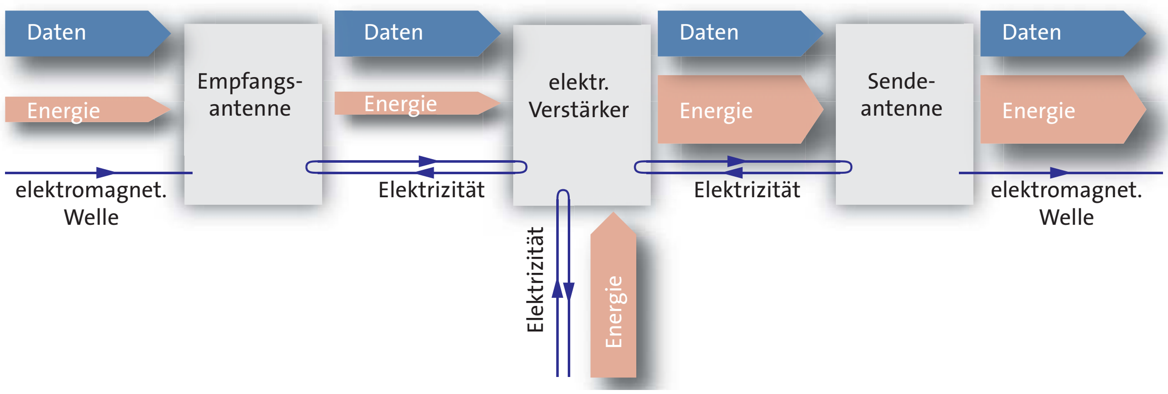


Abb. 20.11 Symbolische Darstellung der elektrischen Einrichtungen eines Fernmeldeturms

Neben der eigentlichen Datenquelle gibt es nämlich immer noch andere „Datenquellen“: Überall, in jeder Leitung und in jedem Umlader, entstehen unkontrollierbare Störungen. Und Störungen sind auch Daten — allerdings Daten, an denen der Empfänger nicht interessiert ist, die für ihn keinen Sinn haben. Stellt man etwa am Radioempfänger einen schwachen, d.h. weit entfernten Sender ein, so hört man neben der eigentlichen Sendung die verschiedensten Störungen. Bei einem guten Datenempfang müssen die erwünschten Signale viel stärker sein als dieses „Rauschen“, und stärker heißt: Sie müssen mehr Energie haben.

Auf den Abb. 20.12a und Abb. 20.12b sind die Störungen durch die von unten kommenden Pfeile dargestellt. (Der Daten- und Energieträger wurde der Übersichtlichkeit halber weggelassen.) Abb. 20.12a zeigt eine schlechte Datenübertragung: Die erwünschten Daten haben weniger Energie als die Störungen. Die Datenübertragung von Abb. 20.12b ist besser. Die Störungen haben, verglichen mit den erwünschten Daten, wenig Energie. Der Empfänger kann darum leicht zwischen den erwünschten Daten und den Störungen unterscheiden.

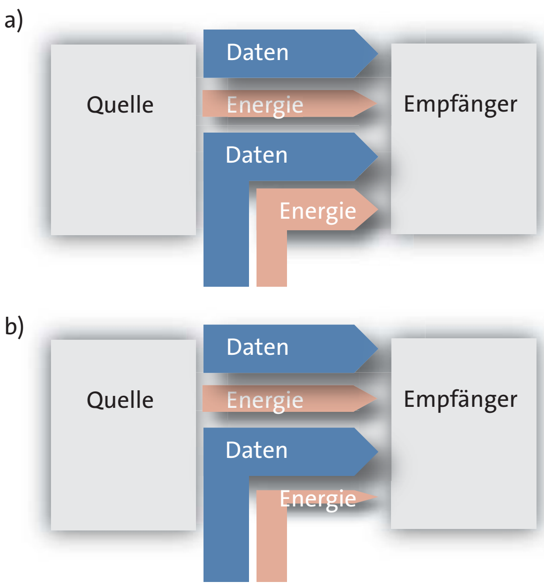


Abb. 20.12 Symbolische Darstellung einer Datenübertragung mit Störungen. (a) Schlechte Übertragung. (b) Bessere Übertragung

Was herauskommt, wenn der Empfänger zwischen erwünschten Daten und Störungen nicht mehr unterscheiden kann, zeigt das Spiel „Stille Post“: Mehrere Personen stellen sich in einer Reihe auf. Die erste Person in der Reihe flüstert der zweiten einen Satz zu, die zweite flüstert diesen Satz oder das, was sie davon verstanden hat, der dritten zu usw. Bei der letzten kommt dann oft etwas an, was mit dem ursprünglichen Satz nicht mehr viel zu tun hat. Hätten alle Spielteilnehmer laut gesprochen, d.h. ihre Daten mit mehr Energie versehen, so wäre der Satz wahrscheinlich unversehrt beim Letzten angekommen.

Aufgaben

1. Nenne vier Beispiele für Datenübertragungen, an denen Verstärker beteiligt sind.
2. Auch ein Mensch kann die Rolle eines Verstärkers übernehmen. Nenne ein Beispiel.

20.2 Datenverarbeitung

Wir hatten den Transport und die Speicherung von Daten untersucht. Wir wenden uns nun der Datenverarbeitung zu. Datenverarbeitung findet in natürlichen und in technischen Systemen statt. Ein natürliches System, in dem Daten verarbeitet werden, ist das Gehirn von Mensch und Tier, ein technisches ist der Computer. Datenverarbeitende Systeme haben eine hierarchische Struktur. Man kann ihre Funktionsweise auf den verschiedenen Ebenen der Hierarchie beschreiben.

Die Grobstruktur datenverarbeitender Systeme

Eine Computeranlage besteht aus den folgenden großen Baueinheiten: 1. dem Computer selbst, 2. mehreren Ein- und Ausgabegeräten und 3. mehreren Speichern.

Ein Eingabegerät dient dazu, ankommende Daten für den Computer aufzubereiten, d.h. die Daten von dem Träger, mit dem sie ankommen, auf den Träger Elektrizität umzuladen und so zu codieren, dass der Computer etwas mit ihnen anfangen kann.

Das Datenausgabegerät codiert die Daten, die der Computer abgibt so, dass der Benutzer etwas mit ihnen anfangen kann. „Benutzer“ kann hier auch eine Maschine sein, die vom Computer gesteuert wird.

Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Ein- und Ausgabegeräte, Tab. 20.1. Die meisten davon wirst du kennen.

Eingabegeräte
Tastatur
Touchscreen
Scanner
Joystick
Maus
Digitalkamera
Mikrofon
verschiedene Sensoren

Ausgabegeräte
Bildschirm
Drucker
Lautsprecher
verschiedene Effektoren

Tab. 20.1 Ein- und Ausgabegeräte des Computers

Viele Computer dienen der Steuerung von industriellen Prozessen, z. B. in einer chemischen Fabrik oder in einem Kraftwerk. Solche Computer haben als Eingabegeräte sogenannte Sensoren. Ein Sensor ist ein Gerät, das irgendeine physikalische Größe misst, z. B. die Temperatur, den Druck oder die Konzentration eines Stoffes, und die Messdaten mit dem Träger Elektrizität weitergibt. Der Computer berechnet aus diesen Messwerten, ob und wie der Prozess beeinflusst werden soll. Er gibt die Daten, die das Ergebnis seiner Rechnungen darstellen, an Ausgabegeräte weiter, die man Effektoren nennt. Effektoren sind z. B. elektrisch gesteuerte Ventile oder elektrisch gesteuerte Schalter, mit denen Pumpen, Gebläse, Heizungen oder Ähnliches ein- und ausgeschaltet werden können, um den in der Fabrik ablaufenden Prozess zu beeinflussen.

Die Struktur natürlicher datenverarbeitender Systeme ist ganz ähnlich. Dem Computer entspricht das Gehirn, den Eingabegeräten entsprechen die Sinnesorgane und als Ausgabegerät fungiert z. B. die Stimme oder die schreibende Hand.

Die unteren Ebenen datenverarbeitender Systeme

Wir fahren mit der Beschreibung datenverarbeitender Systeme auf einer sehr viel tieferen Ebene fort. Die Strukturen, um die es hier geht, sind so klein, dass man sie nur noch mit einem Mikroskop erkennen kann.

Beim Computer befinden sich auf dieser Ebene die elektronischen Bauelemente. Unter ihnen ist der Transistor das wichtigste. Die Funktionsweise des Transistors wirst du später kennen lernen. Wir erwähnen hier nur, dass ein Transistor ein elektrisch gesteuerter Schalter ist. Er tut also dasselbe wie ein Relais — nur sehr viel schneller.

Die gesamte Datenverarbeitung in einem Computer lässt sich auf das Öffnen und Schließen solcher „Schalter“ zurückführen. Da ein Schalter entweder offen oder geschlossen ist, sich also nur in einem von zwei Zuständen befinden kann, muss die Datenverarbeitung im Computer mit binär codierten Daten geschehen.

Die Beschreibung des Computers, die wir hier geben, entspricht den Geräten, die man heutzutage baut. Computer könnten aber auch ganz anders gebaut sein.

Die alten Rechenmaschinen, die ja auch schon eine primitive Art Computer darstellten, arbeiteten rein mechanisch. Später wurden Relais als Schalter verwendet. Die heutigen elektronischen Computer haben gegenüber diesen elektromechanischen Maschinen große Vorteile: Ein Transistor ist sehr viel kleiner und sehr viel billiger als ein Relais; er ist außerdem viel zuverlässiger und er arbeitet viel schneller. Dass der elektronische Computer so viele Vorzüge hat, bedeutet aber nicht, dass es nicht ganz anders funktionierende Computer geben könnte, die noch leistungsfähiger wären. So arbeitet man an der Entwicklung optischer Computer, von denen man erwartet, dass sie noch schneller sind als die gegenwärtigen elektronischen Geräte. Datenträger ist hier nicht die Elektrizität, sondern das Licht.

Auch das Gehirn besteht aus vielen, sehr kleinen Bauelementen, von denen sich jedes in einem von zwei Zuständen befinden kann. Dies sind die Nervenzellen oder Neuronen. Die Zahl der Neuronen im Gehirn beträgt etwa 10^{10}. Das ist etwa so viel wie ein Computer Transistoren hat. Außerdem ist eine Nervenzelle ein wesentlich komplizierteres Bauelement als ein Transistor. Ein Neuron hat etwa 10 000 Eingänge, aber nur einen einzigen Ausgang, Abb. 20.13. Die Ausgangsleitung verzweigt sich sehr stark und ist mit den Eingängen anderer Nervenzellen verbunden. Man nennt eine solche Struktur ein neuronales Netz.

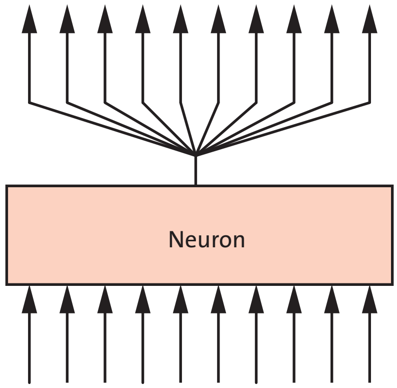


Abb. 20.13 Symbolische Darstellung eines Neurons

Jeder Eingang einer Nervenzelle kann sich auf einem hohen oder niedrigen elektrischen Potenzial befinden. Es hängt von der Zahl der Eingänge ab, die auf hohem Potenzial liegen, ob sich der Ausgang der Nervenzelle auf hohem oder niedrigem Potenzial befindet.

Computerprogramme

Man kann sich leicht eine datenverarbeitende Maschine vorstellen, die nur einen einzigen Aufgabentyp bewältigen kann. Eine solche Maschine wäre sehr unpraktisch. Für jede neue Aufgabe müsste man ein neues Gerät bauen. Mit einem Computer kann man aber sehr viele verschiedene Aufgaben lösen. Selbst beim Taschenrechner hat man schon die Möglichkeit, zwischen mehreren Aufgaben durch Drücken der geeigneten Taste zu wählen: Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren, Dividieren, Wurzelziehen etc. Bei richtigen Computern besteht diese Möglichkeit in noch viel größerem Ausmaß. Wenn man ihn programmiert, erteilt man ihm Anweisungen. Eine Anweisung kann den Computer z. B. dazu veranlassen, eine bestimmte Rechenoperation auszuführen, einen Zahlenwert aus dem externen Speicher zu lesen, einen Buchstaben auf den Bildschirm zu schreiben usw.

Datenreduktion

Eine Datenverarbeitungsanlage nimmt Daten auf und gibt Daten ab. Dasselbe trifft aber auch für Datenumlader und Codierer zu. Bedeutet das, dass ein Computer im Grunde nicht mehr ist als ein Codierer? Dass die Daten am Eingang dieselbe Information enthalten wie am Ausgang, nur anders verschlüsselt? Wäre das der Fall, so müsste die Datenmenge der aufgenommenen Daten genauso groß sein wie die der abgegebenen. Wir wollen untersuchen, ob das zutrifft. Wir betrachten zu diesem Zweck ein einfaches Beispiel.

Ein Computer sei so programmiert, dass er den Mittelwert von Zahlen berechnen kann. Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass die einzugebenden Zahlen ganze Zahlen sind, und dass der Mittelwert ohne Stellen hinter dem Komma berechnet wird.

Wir lassen den Computer den Notenmittelwert einer Klassenarbeit berechnen. Wir nehmen an, die Klasse habe 30 Schüler und bei der Arbeit seien maximal 15 Punkte zu erreichen gewesen. In den Computer werden also 30 Zahlen eingetippt, von denen jede eine der 16 verschiedenen ganzen Zahlen von 0 bis 15 ist. Da $16 = 2^4$ ist, bekommt der Computer mit jeder Zahl 4 bit, zusammen also

$$30 \cdot 4 \text{ bit} = 120 \text{ bit}.$$

Man startet nun das Programm, und der Computer gibt kurz darauf den Mittelwert aus: eine einzige der Zahlen von 0 bis 15. Die Datenmenge am Ausgang beträgt damit nur 4 bit, Abb. 20.14. Der Computer hat also die Datenmenge vermindert oder „reduziert".

> Der Computer reduziert die Datenmenge.

Abb. 20.14 Die Menge der Daten, die in den Computer hineingehen, ist größer als die Menge der Daten, die herauskommen.

Was der programmierte Computer tut	Eingabedaten	Ausgabedaten
positive und negative Zahlen addieren	10; 5 5; 10 14; 1 –123; 138	15 15 15 15
UND-Verknüpfung ausführen	0; 0 1; 0 0; 1	0 0 0
Namen alphabetisch ordnen	Bob; Willy; Lilly Bob; Lilly; Willy Willy; Bob; Lilly	Bob; Lilly; Willy Bob; Lilly; Willy Bob; Lilly; Willy
Dezimalzahl auf drei Stellen hinter dem Komma runden	2,7184 2,7182818 2,7176	2,718 2,718 2,718
Wurzel auf drei Stellen hinter dem Komma berechnen	2 1,998 2,0007	1,414 1,414 1,414

Tab. 20.2 Die Datenmenge am Ausgang des Computers ist kleiner als die am Eingang.

Das ist überraschend. Heißt das denn, dass jemand, der die Daten vom Ausgang bekommt, weniger weiß, als jemand, der die Daten des Eingangs bekommt? Ja, genau das heißt es. Derjenige, der nur den Mittelwert kennt, kann daraus die Einzelpunktzahlen der Schüler nicht rekonstruieren. Aber ist das nicht schlecht? Wozu benutzt man denn den Computer überhaupt? Man benutzt ihn gerade deshalb, weil man mit den vielen Daten am Eingang nicht zurechtkommt. Wenn es einem z. B. darum geht, die Schulklasse als Ganzes mit einer Parallelklasse zu vergleichen, so ist einem die Datenmenge am Eingang des Rechners zu groß. Bei großen Datenmengen verliert der Mensch leicht die Übersicht, er kann die Daten nicht bewältigen. Er benutzt also den Computer nicht, weil er zu wenige, sondern weil er zu viele Daten hat.

Dass die Datenmenge bei der Verarbeitung im Computer abnimmt, erkennt man daran, dass man die Eingangsdaten aus den Ausgangsdaten nicht wiedergewinnen kann, auch wenn man das Computerprogramm genau kennt. Man kann dieselben Daten am Ausgang durch unterschiedliche Daten am Eingang erzeugen. Tab. 20.2 zeigt dafür einige Beispiele. In der linken Spalte ist beschrieben, was der programmierte Computer tut. In der mittleren Spalte stehen Beispiele für Daten, die man eingibt, und in der rechten Spalte stehen die Daten, die am Ausgang erscheinen.

Die beiden letzten Beispiele zeigen, dass schon durch Runden ein Datenverlust entsteht.

In einigen Fällen ist die Datenmenge am Ausgang genauso groß wie am Eingang, d. h., man kann die Eingangsdaten aus den Ausgangsdaten zurückgewinnen. Ein sehr einfaches Beispiel hierfür ist die Vorzeichenumkehr. Aber auch jeder Codierer hat diese Eigenschaft. Wird der Computer nur dazu benutzt, Daten zu speichern, so findet natürlich auch keine Datenreduktion statt.

Wir machen die Datenbilanz noch für ein komplizierteres Beispiel. Der Computer soll diesmal zur Bilderkennung verwendet werden, Abb. 20.15. Eingabegerät ist eine Digitalkamera, Ausgabegerät ein Drucker. Im Idealfall geht der Vorgang der Bilderkennung so vor sich: Man richtet die Kamera auf den zu erkennenden Ge-

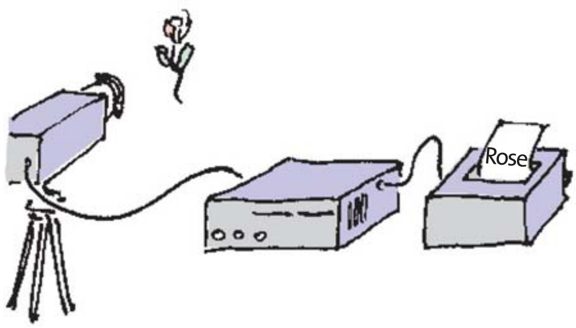


Abb. 20.15 Die Bilderkennungsanlage besteht aus Digitalkamera, Computer und Drucker.

genstand, z. B. eine Rose, man startet das Programm und kurz darauf druckt der Drucker das Wort „Rose“. Praktisch verwendet man das Verfahren etwa zum Lesen von Handschriften oder zum Erkennen von Fingerabdrücken.

Wir nehmen an, auf einem Blatt Papier befinde sich eine Sieben. Die Sieben kann sehr verschieden aussehen, Abb. 20.16. Wie immer sie aber aussieht, der Drucker druckt stets dasselbe: eine ganz gewöhnliche Sieben aus seinem eigenen Zeichensatz. Am Eingang kann also eines von sehr vielen verschiedenen Bildern stehen, nämlich jede denkbare Sieben, am Ausgang erscheint immer dasselbe Bild.

Abb. 20.16 Jedes dieser Zeichen soll der Computer als „Sieben“ erkennen.

Um welchen Betrag wird die Datenmenge in diesem Fall reduziert? Wir hatten früher berechnet, dass ein Bild 50 Mbit enthält. Der Computer bekommt daher von der Kamera 50 Mbit.

Der Drucker bekommt vom Computer die Anweisung, ein Schriftzeichen zu drucken. Ein Schriftzeichen trägt, wie wir auch früher festgestellt hatten, 7 bit.

Der Computer reduziert hier also die Datenmenge von 50 Mbit auf 7 bit.

Was diese Bilderkennungsanlage leistet, tut unser Gehirn Sekunde für Sekunde: Die optische und akustische Wahrnehmung unserer Umgebung beruht auf Datenreduktion. Man kann sich das folgendermaßen klar machen:

Wir verbinden einer Person die Augen, führen sie in eine ihr unbekannte Umgebung, entfernen die Augenbinde für genau eine Sekunde und führen sie dann wieder zurück in die alte Umgebung. Wir fragen sie dann, welche Gegenstände sie gesehen hat. Sie wird uns wahrscheinlich nicht mehr als 10 Gegenstände nennen können. Wie viel bit gibt sie mit dem Benennen dieser 10 Gegenstände von sich?

Um die Datenmenge zu erhalten, die der Name eines Gegenstandes trägt, müssen wir wissen, wie viele Gegenstände mit verschiedenen Namen es überhaupt gibt. Da jeder Gegenstand einen Namen hat, steht er auch im Wörterbuch. Ein typisches Wörterbuch enthält 60 000 Wörter. Wir schätzen daher großzügig, dass es 60 000 Gegenstände unterschiedlichen Namens gibt. Das bedeutet, dass wir mit jeder Nennung eines Gegenstandes eine Datenmenge von etwa 16 bit erhalten. Mit der Nennung von 10 Gegenständen bekommen wir die Datenmenge

$$10 \cdot 16 \text{ bit} = 160 \text{ bit}.$$

Wie viel bit hat aber die Person in der Sekunde, die sie schauen durfte, aufgenommen? Wir hatten früher abgeschätzt, dass ein Fernsehapparat pro Sekunde 1000 Mbit abgibt. Da es sich in unserem Fall, genauso wie beim Fernsehen, um optische Wahrnehmung handelt, hat auch unsere Testperson in der Sekunde, die wir sie haben sehen lassen, 1000 Mbit aufgenommen.

Die Datenmenge wird hier also von 1000 Mbit auf 160 bit reduziert. Auch in Auge und Gehirn des Menschen findet somit eine gewaltige Datenreduktion statt, und man erkennt, dass diese der wesentliche Bestandteil dessen ist, was man Wahrnehmung nennt.

> Wahrnehmung beruht auf Datenreduktion.

Den riesigen Datenstrom, der durch die Pupillen in die Augen gelangt, könnte das Gehirn ohne Reduktion nicht weiterverarbeiten.

Aufgaben

1. Begründe, weshalb der Computer eine Datenreduktion durchführt, wenn er so programmiert ist, dass er zu jeder eingegebenen ganzen Zahl x den Wert von x^2 berechnet und am Bildschirm anzeigt.
2. Wird die Datenmenge vermindert, wenn man den Wert von x^3 berechnet? (x = ganze Zahl)

20.3 Verallgemeinerung der Definition der Datenmenge

Abb. 20.17 zeigt drei Beispiele für Datenübertragungen zwischen einer Person A (der Quelle) und einer Person B (dem Empfänger). Die drei Beispiele unterscheiden sich im Zeichenvorrat. Im Fall (a) stehen 2 Zeichen zur Verfügung, nämlich grünes Licht und rotes Licht. Im Fall (b) sind es 8 Zeichen, nämlich die Ziffern 1 bis 8, und im Fall (c) sind es 32 Zeichen: 26 Großbuchstaben und 6 Satzzeichen. Wir stellen uns nun die Frage, wie schwer es für den jeweiligen Empfänger B ist, das nächste Zeichen zu erraten, noch ehe es bei ihm eingetroffen ist.

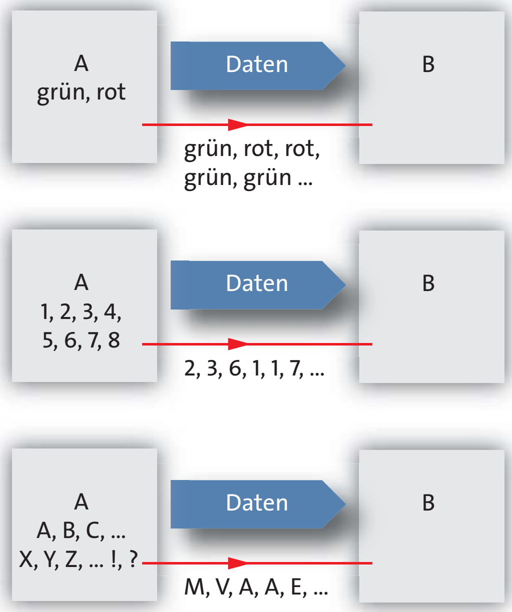


Abb. 20.17 Drei Datenübertragungen mit unterschiedlichem Zeichenvorrat

Im ersten Fall hat B eine Chance von 1 : 2, richtig zu tippen. Man sagt, die Wahrscheinlichkeit dafür, dass B richtig rät, ist 0,5. Im zweiten Fall ist es schon unwahrscheinlicher, dass B richtig rät, die Wahrscheinlichkeit ist 1 : 8 = 0,125, und im dritten Fall beträgt die Wahrscheinlichkeit nur 1 : 32 = 0,031.

Nun wissen wir, dass im ersten Fall mit einem Zeichen 1 bit übertragen wird, im zweiten Fall sind es 3 bit und im dritten 5 bit pro Zeichen. Wir haben damit die Regel:

> Je leichter es für den Empfänger ist, ein Zeichen vorauszusagen, desto weniger bit trägt das Zeichen.

Wir brauchen dieses Ergebnis für die Analyse des folgenden Ratespiels.

Willy denkt sich eine der ganzen Zahlen von 1 bis 64. Bob soll die Zahl herausfinden, indem er möglichst wenige Ja-Nein-Fragen an Willy stellt.

Wir nehmen an, Willy denkt sich die 28. Bob kann nun verschiedene Ratestrategien anwenden. Wir wollen zwei solche Strategien miteinander vergleichen.

1. Strategie

B: Ist es die 1?
W: Nein.
B: Ist es die 2?
W: Nein.
B: Ist es die 3?
W: Nein.
. . .
B: Ist es die 28?
W: Ja.

Bob hat 28 Fragen gebraucht, um die Zahl herauszubekommen.

2. Strategie

B: Ist die Zahl größer als 32?
W: Nein.
B: Ist die Zahl größer als 16?
W: Ja.
B: Ist die Zahl größer als 24?
W: Ja.
B: Ist die Zahl größer als 28?
W: Nein.
B: Ist die Zahl größer als 26?
W: Ja.
B: Ist die Zahl größer als 27?
W: Ja.

Bob kennt die Zahl, nachdem er 6 Fragen gestellt hat.

Dieses Beispiel stellt uns vor ein Problem. Wir hatten früher das Bit folgendermaßen definiert: Ein bit ist die Datenmenge, die mit der Antwort auf eine Ja-Nein-Frage übertragen wird. Wie viel bit hat nun Bob bekommen? 28 oder 6? Die Datenmenge, die insgesamt übertragen wurde, kann ja nicht davon abhängen, ob sich die Partner bei der Übertragung dumm oder klug anstellen. Welches auch immer die Strategie ist — am Ende weiß Bob die Zahl, d. h., die Daten sind bei ihm angekommen.

Wie viel bit Bob wirklich bekommen hat, können wir auch auf einem anderen, sichereren Weg entscheiden: Willy hätte ja Bob die Zahl auch einfach nennen können. In diesem Fall ist es leicht, die Bit-Zahl anzugeben: Die Zahl stellt eine Auswahl aus einem Zeichenvorrat von 64 Zeichen dar. Da $64 = 2^6$ ist, trägt die Zahl 6 bit. Bob muss also auch beim Ratespiel insgesamt 6 bit bekommen. Das bedeutet aber, dass er bei Verwendung der ersten Strategie pro Ja-Nein-Frage weniger als 1 bit bekommt.

Dass Bob bei der schlechten Strategie pro Antwort weniger bit bekommt als bei der guten, stimmt auch mit der Regel überein, die wir am Anfang dieses Abschnitts gefunden hatten: „Je leichter es für den Empfänger ist, ein Zeichen vorauszusagen, desto weniger bit trägt das Zeichen." Tatsächlich hat Bob bei der schlechten Strategie eine große Chance, die richtige Antwort vorauszusagen. Er weiß nämlich, dass auf die Frage „Ist es die 1?" mit großer Wahrscheinlichkeit die Antwort „Nein" kommt. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er sich irrt, beträgt nur 1 : 64, die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er Recht hat 63 : 64. Bei der guten Strategie ist seine Unsicherheit über die nächste Antwort viel größer. Egal ob er annimmt, die nächste Antwort sei „ja" oder „nein", die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er Recht hat, ist nur 1 : 2.

Wir schließen aus dem Vergleich der beiden Strategien, dass man mit der Antwort auf eine Ja-Nein-Frage nur dann 1 bit erhält, wenn die beiden Antworten gleich wahrscheinlich sind.

Das Entsprechende gilt, wenn der Zeichenvorrat größer ist, wenn man also keine Binärzeichen mehr verwendet. Enthält der Zeichenvorrat 4 Zeichen, so trägt eines dieser Zeichen nur dann 2 bit, wenn alle 4 Zeichen gleich wahrscheinlich sind. Bei einem Zeichenvorrat von 8 Zeichen trägt jedes Zeichen nur dann 3 bit, wenn alle 8 Zeichen gleich wahrscheinlich sind.

> Mit einem Binärzeichen wird nur dann 1 bit übertragen, wenn die beiden Zeichen des Zeichenvorrats gleich wahrscheinlich sind. In allen anderen Fällen wird weniger als 1 bit übertragen.

Wir hatten früher einmal berechnet, dass mit einem Schriftzeichen knapp 7 bit übertragen werden. Wir hatten dabei stillschweigend vorausgesetzt, dass alle Schriftzeichen gleich wahrscheinlich sind. Tatsächlich sind in einem gewöhnlichen Text die Schriftzeichen nicht gleich wahrscheinlich. So tritt ein „e", ein „t" oder das Leerzeichen häufiger auf als das „q", das „x" oder das Ausrufezeichen. Daraus folgt, dass wir die Bit-Zahl pro Schriftzeichen überschätzt hatten.

Immer wenn man Nachrichten mit einem Zeichensatz überträgt, dessen Zeichen nicht gleich wahrscheinlich sind, sagt man, der entsprechende Code sei redundant.

Man kann z. B. den folgenden, stark redundanten Code vereinbaren. Eine Nachricht wird mit Schriftzeichen übertragen, aber jeder Buchstabe wird zweimal nacheinander übertragen. Das Wort „Baum" sieht dann so aus: „BBaauumm". Nachdem das erste B beim Empfänger angekommen ist, sind die verschiedenen Schriftzeichen sehr ungleich wahrscheinlich: Es kommt als nächstes Zeichen sicher kein a, kein A, kein b, kein c, kein C etc. Der Empfänger weiß genau, dass noch ein B kommen wird. Genauso weiß er, nachdem das erste a angekommen ist, dass der nächste Buchstabe wieder ein a ist.

Redundanz erhöht den Aufwand bei der Übertragung, die Übertragung dauert länger. Trotzdem ist das Vorhandensein von Redundanz oft erwünscht, denn bei einem redundanten Code ist die Nachricht weniger anfällig gegen Störungen auf dem Übertragungsweg. Auch wenn bei der Zeichenfolge BBaauumm ein paar Zeichen verloren gehen, sodass z. B. nur noch B aa umm ankommt, ist das Wort beim Empfänger noch zu erkennen.

Fußball und Zahlenlotto

Willy und Lilly haben wieder einmal eine Datenübertragung mit roten und grünen Lichtzeichen geplant. Lilly soll Willy mitteilen

- um 10:00 h, ob der HSV gewonnen hat (gewonnen: „grün", verloren oder unentschieden: „rot");
- um 10:05 h, ob Willy im Lotto sechs Richtige hat (gewonnen: „grün", nicht gewonnen: „rot").

Bei welcher der beiden Datenübertragungen ist die übertragene Datenmenge größer? Wir benutzen zur Beantwortung dieser Frage die Regel: „Je leichter es für den Empfänger ist, ein Zeichen vorauszusagen, desto weniger bit trägt das Zeichen."

Bei der ersten Übertragung ist es schwer vorauszusagen, ob „rot" oder „grün" kommen wird: Der HSV hat eine gute Chance zu gewinnen, aber sein Gegner ist auch recht stark. Im zweiten Fall dagegen ist Willy ziemlich sicher, dass sein Spiel so ausgeht, wie es bisher immer ausgegangen ist: Er wird keine sechs Richtigen haben. Die übertragene Datenmenge ist also im ersten Fall größer als im zweiten.

Mit unserer verbesserten Definition der Datenmenge kommen wir zu demselben Ergebnis: Wir nehmen an, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der HSV gewinnt, gerade gleich 0,5 ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das erste Zeichen „grün" ist, ist also genauso groß wie die, dass es „rot" ist. Mit dem ersten Zeichen wird daher, nach unserer verbesserten Definition, genau 1 bit übertragen. Bei der zweiten Übertragung dagegen sind die Wahrscheinlichkeiten für „grün" und „rot" sehr unterschiedlich: „rot" ist viel wahrscheinlicher als „grün". Es wird daher weniger als 1 bit übertragen.

Die beste Wägestrategie

Unter 27 gleich aussehenden Kugeln befindet sich eine, die schwerer ist als die 26 anderen, gleich schweren. Mithilfe einer Balkenwaage soll mit möglichst wenigen Wägungen herausgefunden werden, welches die schwerere Kugel ist. Dabei dürfen nur Kugeln auf die Waagschalen gelegt werden, keine Gewichtsstücke oder sonstigen anderen Körper, Abb. 20.18.

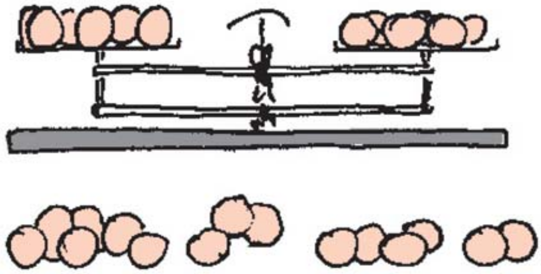


Abb. 20.18 Wie viele Wägungen muss man machen, um die schwerere Kugel zu identifizieren?

Mit jeder Wägung beantwortet die Waage eine Frage, die man ihr stellt. Die Waage kann drei verschiedene Antworten geben: 1. Die rechte Waagschale geht nach unten, 2. die linke Waagschale geht nach unten und 3. Gleichgewicht.

Wenn man mit möglichst wenigen Wägungen auskommen will, muss man die Fragen so stellen, dass man möglichst viele bit pro Wägung erhält. Das bedeutet: Die drei Antworten müssen bei jeder Wägung möglichst gleich wahrscheinlich sein. Es ist sicher ungeschickt, damit anzufangen, dass man auf jede Waagschale eine Kugel legt. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Waage im Gleichgewicht bleibt, ist dann viel größer als die, dass sie sich nach rechts oder nach links neigt.

- Wie viele Wägungen sind notwendig?
- Welches ist die beste Strategie?

Glück und Pech

Wir vergleichen noch einmal die beiden Strategien für das Erraten einer Zahl von 1 bis 64, die wir am Anfang des Abschnitts untersucht hatten. Die schlechte Strategie beginnt mit der Frage „Ist es die 1?". Man sieht, dass man hier Glück oder Pech haben kann. Ist die gedachte Zahl tatsächlich die 1, so hat man sie mit einer einzigen Frage herausbekommen, man hat Glück gehabt. Ist die gedachte Zahl aber die 64, so braucht man 63 Fragen, man hat Pech gehabt.

Bei der guten Strategie sind Glück und Pech ausgeschlossen. Welches auch immer die gedachte Zahl ist, man braucht zum Erraten immer 6 Fragen.

Wenn jemand mit der schlechten Strategie die Zahl mit einer einzigen Frage herausbekommt, kann man also mit Recht sagen, er hatte „mehr Glück als Verstand".

Musik und Datenmenge

Wenn ein Musikstück gespielt und gehört wird, werden Daten übertragen. Der Spieler mit dem Instrument ist die Quelle, der Hörer der Empfänger.

Wir nehmen an, das Instrument sei ein Xylophon mit 15 Tönen. Es sollen nur Viertelnoten angeschlagen werden, wobei eine Viertelpause auch als Ton zählt. Werden alle Töne mit gleicher Wahrscheinlichkeit angeschlagen, so trägt jeder Ton 4 bit, andernfalls weniger.

Während man Musik hört, hat man eine bestimmte Erwartung darüber, welches wohl der nächste Ton sein wird. Bei einer Melodie, die so anfängt, wie es Abb. 20.19 zeigt, erwartet man vielleicht, dass der nächste Ton ein c^1 ist. Es ist unwahrscheinlich, dass z. B. ein f^1 oder ein h^1 folgt.

Abb. 20.19 Welches ist der nächste Ton?

Man kann nun feststellen, dass man ein Musikstück als unschön empfindet,

- wenn die Erwartung zu oft enttäuscht wird;
- wenn die Erwartung zu oft erfüllt wird.

Wenn die Melodie nie so weitergeht wie man es erwartet, erscheint sie uns als chaotisch, oder „unverständlich“. Dieser Fall liegt vor, wenn jeder Ton gleich wahrscheinlich ist, wenn also die Töne die maximale Bit-Zahl tragen.

Geht dagegen die Tonfolge sehr oft so weiter wie man erwartet, so empfindet man sie als langweilig. In diesem Fall bekommt man mit jedem neuen Ton wenig bit, man kann ihn ja leicht im Voraus erraten.

Wir haben damit eine Regel für das Komponieren gefunden: Die Datenmenge darf nicht zu groß und nicht zu klein sein.

Die historische Entwicklung der Musik verlief so, dass die Datenmenge ständig zugenommen hat. Das erklärt, warum man die jeweils moderne Musik stets als schwerer verständlich empfunden hat, als die alte.

Aufgaben

1. Willy würfelt mit einem gewöhnlichen Würfel (d. h. Augenzahlen von 1 bis 6). Lilly soll die Augenzahl mit möglichst wenigen Ja-Nein-Fragen herausbekommen. Wie kann Lilly die erste Frage stellen, um mit der Antwort 1 bit zu bekommen? Gib zwei Möglichkeiten an. Begründe, weshalb Lilly mit der Antwort auf die Frage „Ist es die Sechs?“ weniger als 1 bit erhält.
2. Ein Skatspiel besteht aus 32 verschiedenen Karten. Welches ist die Minimalzahl an Ja-Nein-Fragen, die man stellen muss, um eine wahllos herausgegriffene Karte mit Sicherheit zu erraten?
3. Lilly denkt sich irgendeinen Begriff. Willy muss den Begriff herausfinden, indem er Ja-Nein-Fragen an Lilly stellt, und zwar so wenige Fragen wie möglich. Welche Strategie muss Willy verfolgen? Wie viele Fragen sind bei dieser Strategie ungefähr notwendig?

21 DAS LICHT

21.1 Lichtquellen

Gegenstände, die Licht aussenden, nennt man Lichtquellen. Zu ihnen gehören:

- die Sonne und die anderen Fixsterne,
- der Glühdraht einer Glühlampe,
- die Leuchtröhre,
- die Flamme einer Kerze,
- die Leuchtdiode,
- der Bildschirm des Fernsehers,
- der Laser.

Man kann einen Gegenstand dadurch zum Leuchten bringen, dass man ihn erhitzt. Jeder Gegenstand, jeder Stoff beginnt zu leuchten, wenn seine Temperatur über etwa 800 °C ansteigt. Einige der aufgezählten Lichtquellen beruhen auf diesem Prinzip: Sonne, Fixsterne und Glühlampen. Auch die Kerzenflamme leuchtet nur deshalb, weil sich in der Flamme sehr kleine glühende Kohlenstoffpartikel befinden.

Man kann aber auch Licht erzeugen, ohne etwas zu erhitzen: Die Leuchtröhre, die Leuchtdiode, der Fernsehbildschirm und der Laser sind kalte Lichtquellen.

Nicht jeder Gegenstand, von dem Licht ausgeht, ist eine Lichtquelle. Viele Körper geben nur deshalb Licht ab, weil sie Licht empfangen. Sie werfen das ankommende Licht, oder einen Teil davon, einfach zurück. Die meisten Körper, die uns umgeben, gehören in diese Kategorie. Insbesondere gibt es auch einige gut sichtbare Himmelskörper, die nicht selbst leuchten, die nur das Licht zurückwerfen, das sie von der Sonne bekommen: der Mond und die Planeten.

21.2 Einige Eigenschaften des Lichts

Licht ist ein Stoff — allerdings ein recht eigenartiger Stoff. Wir diskutieren einige seiner Eigenschaften.

Die Geschwindigkeit des Lichts

Wir blenden aus dem Licht, das von einer Glühlampe kommt, einen Lichtstrahl aus. Oder wir benutzen gleich einen Laser, denn ein Laser erzeugt von vornherein einen dünnen Lichtstrahl.

Wo der Strahl auf die Wand trifft, sieht man einen hellen Fleck. Wir unterbrechen den Lichtstrahl für kurze Zeit, indem wir mit der Hand durch ihn hindurchfahren. Der Fleck an der Wand verschwindet im selben Augenblick, in dem die Hand den Strahl unterbricht, und er taucht wieder auf, sobald die Hand den Lichtweg wieder freigibt. Das Licht scheint, um von der Stelle der Hand bis zur Wand zu gelangen, keine Zeit zu brauchen. Tatsächlich braucht es doch eine gewisse, wenn auch sehr, sehr kurze Zeit. Licht bewegt sich nämlich sehr schnell: mit der Geschwindigkeit $v = 300\,000$ km/s.

Wie kann man das so eindeutig sagen? Hängt die Geschwindigkeit des Lichts nicht davon ab, wie schnell es von der Quelle weggeschleudert wird? Gibt es denn keine Lichtquellen, die langsameres Licht abgeben? Schließlich kann man doch auch einen schnelleren oder langsameren Wasserstrahl erzeugen. Nein, man kann das Licht nicht schneller und nicht langsamer machen als 300 000 km/s — wenigstens, solange sich das Licht in der Luft oder im Vakuum bewegt.

Es gibt aber doch eine Methode, Licht dazu zu bringen, dass es sich langsamer bewegt: Man lässt es in Glas laufen, oder in einem anderen durchsichtigen festen oder flüssigen Material. Die Lichtgeschwindigkeit in Glas beträgt etwa 200 000 km/s. In Wasser bewegt sich Licht mit einer Geschwindigkeit von 225 000 km/s. Ein richtiges Bremsen des Lichts ist das aber nicht, denn sobald das Licht aus dem Glas oder dem Wasser wieder austritt, nimmt es seine alte Geschwindigkeit von 300 000 km/s wieder an, Abb. 21.1. Zu jedem Material gehört also eine bestimmte Lichtgeschwindigkeit.

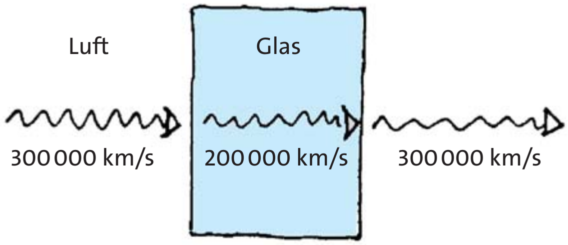


Abb. 21.1 Wenn das Licht aus dem Glas austritt, nimmt es wieder die alte Geschwindigkeit an.

> In Luft und in Vakuum bewegt sich Licht mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km/s.

Dass die Geschwindigkeit des Lichts so hoch ist, hat eine Konsequenz, die jeder kennt: Es bewegt sich praktisch geradlinig. Der Wasserstrahl in Abb. 21.2 ist zur Erde hin gekrümmt. Je stärker der Strahl ist – je schneller sich das Wasser bewegt –, desto gerader wird er. Würde sich das Wasser im Wasserstrahl so schnell bewegen wie das Licht, so wäre der Wasserstrahl auch so gerade wie ein Lichtstrahl.

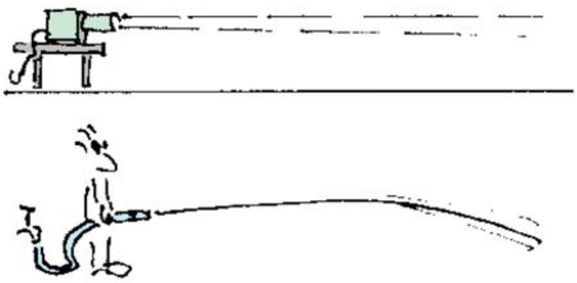


Abb. 21.2 Das Wasser des Wasserstrahls fällt zur Erde, das Licht des Lichtstrahls dagegen (fast) nicht.

> Licht bewegt sich (fast) geradlinig.

Licht ist unsichtbar

Kann man Licht sehen? Eigentlich enthält schon die Frage einen Widerspruch. Sie ist von der Art wie etwa die Frage: „Kann man Geld bezahlen?“ Denn Licht ist ja gerade das Hilfsmittel, mit dem wir sehen. Wenn wir einen Gegenstand sehen, kommt Licht von dem Gegenstand in unsere Augen. Wir sagen dann: „Wir sehen den Gegenstand“, und nicht „wir sehen das Licht, das von dem Gegenstand kommt“. Trotzdem mag es einen wundern, dass man Licht tatsächlich nicht sehen kann. Um uns davon zu überzeugen, lassen wir einen Laserstrahl von links nach rechts durch den Klassenraum laufen. Wir sehen den Laser, und wir sehen einen hellen Fleck an der Wand, aber zwischendrin, über den ganzen Weg des Lichts sehen wir nichts – es sei denn, die Luft ist staubig. Dann sehen wir den Weg des Lichtstrahls. Aber was wir dabei sehen, ist wieder nicht das Licht, sondern es sind die beleuchteten Staubteilchen.

Es ist übrigens eindrucksvoll, sich klar zu machen, dass der schwarze Nachthimmel voll ist mit Licht, außer in einem kleinen Bereich im Schatten der Erde. Aber dieses Licht sehen wir nicht, Abb. 21.3.

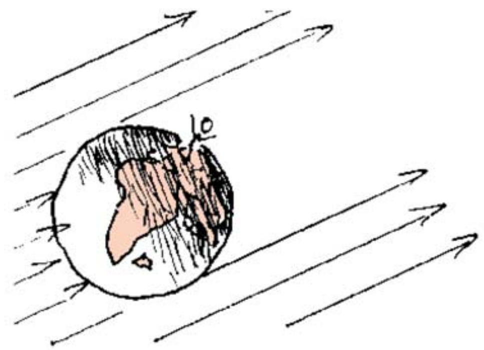


Abb. 21.3 Der schwarze Nachthimmel ist voll mit Licht.

Obwohl das Licht nicht sichtbar ist, spricht man oft von „sichtbarem“ Licht, um es zu unterscheiden von Lichtsorten, für die unsere Augen nicht empfindlich sind, etwa das ultraviolette und das infrarote Licht. Das ultraviolette und das infrarote Licht nennt man „unsichtbares“ Licht.

Das Gewicht des Lichts

Licht ist sehr leicht. (Das Wort „Licht“ hat denselben Ursprung wie das Wort „leicht“.)

Man könnte glauben, und man hat auch lange Zeit geglaubt, Licht habe gar kein Gewicht. Das hat sich aber als falsch erwiesen. Man kann inzwischen die Masse von Licht sogar feststellen. Das Licht, das eine 60-W-Lampe in einer Stunde abgibt, wiegt etwa 10^{-13} kg. Bei unserer wichtigsten Lichtquelle, der Sonne, kommen allerdings recht große Massen zusammen. Das Licht, das die Sonne in einer Sekunde abstrahlt, wiegt etwa vier Millionen Tonnen. Um so viel wird also die Sonne in jeder Sekunde leichter.

Die Durchdringung von Licht durch Licht

Wir erzeugen zwei Lichtbündel und richten sie auf eine Wand, Abb. 21.4a. Wir drehen nun die Lichtquellen so, dass sich die Lichtbündel durchdringen, Abb. 21.4b. Was passiert, wenn man das eine Lichtbündel unterbricht? Merkt das zweite etwas davon? Es passiert gar nichts. Offensichtlich durchdringen sich Lichtstrahlen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Der eine läuft einfach durch den anderen hindurch.

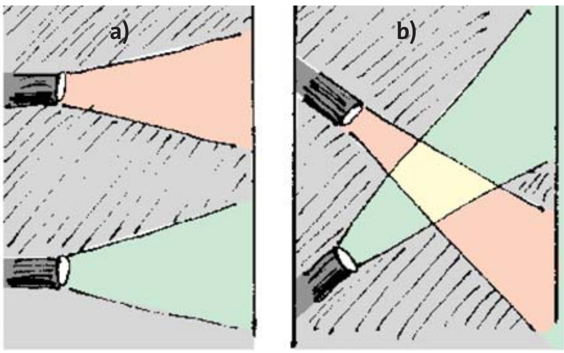


Abb. 21.4 Die beiden Lichtbündel tun sich gegenseitig nichts.

> Lichtstrahlen durchdringen sich, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Reines Licht und Lichtgemische – Lichtsorten

Lässt man einen dünnen Strahl des weißen Lichts, das von der Sonne kommt, oder des Lichts einer Glühlampe auf ein Glasprisma fallen, Abb. 21.5, so macht man zweierlei bemerkenswerte Beobachtungen:

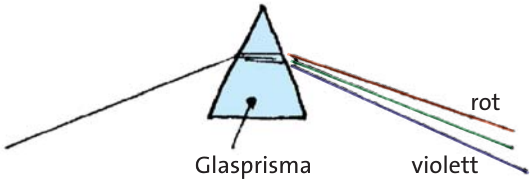


Abb. 21.5 Das Gemisch der einfallenden Lichtsorten wird durch das Prisma in seine Bestandteile zerlegt.

- Das Licht wird durch das Prisma umgelenkt, der Lichtstrahl macht einen Knick. Schaut man genau hin, so stellt man fest, dass er sogar zwei Knicke macht: einen an der Fläche, durch die er in das Prisma eintritt, und einen an der Austrittsfläche. Im Innern des Prismas läuft er gerade.
- Lässt man das austretende Licht auf einen weißen Schirm fallen, der sich in größerer Entfernung vom Prisma befindet, so sieht man auf dem Schirm die Farben des Regenbogens, Abb. 21.6.

Abb. 21.6 Reihenfolge der Lichtsorten auf dem Schirm nach der Zerlegung durch das Prisma

Man interpretiert diese Beobachtungen so: Weißes Licht enthält verschiedene Bestandteile, verschiedene Lichtsorten. Jede einzelne dieser Lichtsorten ruft in unseren Augen eine bestimmte Farbempfindung hervor. Wenn alle diese Lichtsorten zusammen unsere Augen erreichen (genauer: wenn sie alle auf dieselbe Stelle der Netzhaut fallen), so empfinden wir „weiß“.

Was geschieht nun mit dem weißen Lichtgemisch im Prisma? Das Prisma lenkt Lichtstrahlen ab. Aber es lenkt nicht alle Lichtsorten gleich stark ab. Darum zerlegt es das weiße Gemisch in seine Bestandteile.

Wir können die Lichtsorten durch den Farbeindruck charakterisieren, den sie in unseren Augen hervorrufen. Wir werden aber später sehen, dass der Farbeindruck kein sehr zuverlässiges Kennzeichen einer Lichtsorte ist. Unsere Augen sind nämlich so gebaut, dass ein und derselbe

Farbeindruck auf unterschiedliche Arten zustande kommen kann.

Außerdem gibt es Licht, auf das unsere Augen gar nicht reagieren. So gibt es Licht, das durch das Prisma weniger abgelenkt wird als das rote Licht. Man nennt es infrarotes Licht, Abb. 21.7. Infrarotes Licht wird von allen Gegenständen abgestrahlt, wenn ihre Temperatur nur höher ist als 0 K. Je höher die Temperatur, desto mehr strahlen die Gegenstände.

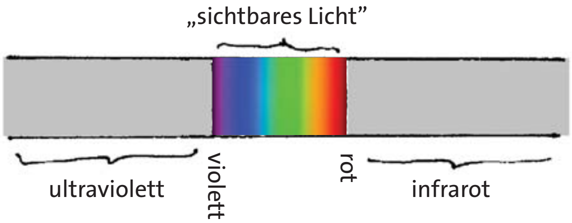


Abb. 21.7 Jenseits des blauen und des roten Lichts treffen „unsichtbare" Lichtsorten auf den Schirm.

Es gibt auch Licht, das vom Prisma stärker abgelenkt wird als das violette Licht. Man nennt es ultraviolettes Licht. Es bildet einen kleinen Anteil des Sonnenlichts und auch einiger künstlicher Lichtquellen.

Du wirst später lernen, dass zu den Lichtsorten noch viele andere Strahlungen gehören, von denen du sicher schon gehört hast:

- Gammastrahlen, die manche radioaktiven Stoffe abgeben,
- Röntgenstrahlen,
- Mikrowellen,
- Strahlung, die beim Radar benutzt wird,
- Radio- und Fernsehwellen.

Alle diese Strahlungen sind also von derselben Natur. Du siehst, dass manche von ihnen den Namen Wellen tragen. Tatsächlich haben sie alle — und damit auch das Licht — etwas mit den Wellen des Wassers gemeinsam. Man sagt daher auch von all diesen Strahlen, es seien Wellen. Der vollständige Name ist „elektromagnetische Wellen". Auch Licht ist also eine elektromagnetische Welle.

Bei einer Welle im Wasser nennt man den Abstand zwischen zwei benachbarten „Wellenbergen" die Wellenlänge, Abb. 21.8. (Dies ist natürlich auch der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellentälern oder zwei sonstigen gleichwertigen Punkten.)

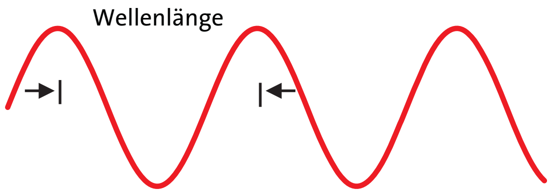


Abb. 21.8 Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen.

Genauso hat nun auch Licht eine Wellenlänge, und zwar jede Lichtsorte eine andere. Jede Lichtsorte ist eine Welle einer anderen Wellenlänge. Und Lichtgemische, wie das weiße Licht zum Beispiel, sind Gemische aus Wellen verschiedener Wellenlängen. Die Wellenlänge der verschiedenen Lichtsorten, die wir mit den Augen wahrnehmen können, sind sehr, sehr klein: Sie liegen im Bereich von 400 nm bis 800 nm. „nm" ist die Abkürzung von Nanometer. Ein Nanometer ist ein Millionstel Millimeter.

Abb. 21.9 zeigt die Zuordnung zwischen Farben und Wellenlängen.

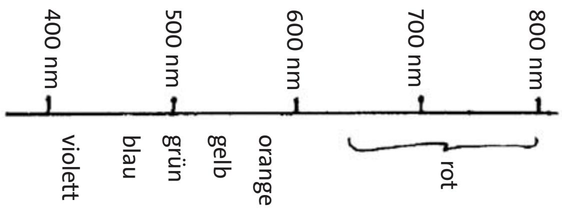


Abb. 21.9 Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge

Diese Erklärung über die Wellennatur des Lichts ist nur ein Vorgriff. Sie gestattet uns im Augenblick nur, die Lichtsorten eindeutig zu kennzeichnen. Wir können zum Beispiel sagen, der Laser gibt Licht von der und der Wellenlänge ab, statt einfach zu sagen, das Licht sei rot.

Aber bedenke, dass wir eigentlich mehr neue Fragen aufwerfen als beantworten, z. B.: Wie kann man denn den Wert der Wellenlänge einer bestimmten Lichtsorte feststellen? Und was ist denn hier eigentlich gewellt? Diese Fragen führen uns im Augenblick von unserem eigentlichen Thema weg. Wir werden sie später genauer untersuchen.

21.3 Wenn Licht auf Materie trifft

Licht und Luft tun sich gegenseitig nicht viel. Licht läuft durch die Luft fast genauso ungestört hindurch wie durch den luftleeren Raum zwischen Sonne und Erde. Dasselbe gilt für andere Gase.

Trifft das Licht dagegen auf feste oder flüssige Materie, so kann es sehr stark verändert werden. Im Wesentlichen kann ihm zweierlei widerfahren:

- Seine Richtung kann sich ändern.
- Seine Zusammensetzung aus Lichtsorten kann sich ändern.

Wir beginnen unsere Untersuchung mit der Frage, was mit der Richtung des Lichts passiert, wenn es auf einen Gegenstand trifft. Wir brauchen für diese Untersuchung einen abgedunkelten Raum und Licht einheitlicher Richtung; es muss nicht aus einer einzigen Sorte bestehen. Wir stellen also zunächst einen Strahl weißes Licht her.

Reflexion und Streuung

Viele Körper werfen das Licht, das auf sie trifft, fast vollständig zurück. Dieses Zurückwerfen kann allerdings auf unterschiedliche Art geschehen.

Wir lassen unseren weißen Lichtstrahl auf ein Blatt weißes Papier fallen. Das Papier wirft das Licht in alle Richtungen zurück, Abb. 21.10. Man erkennt es daran, dass der ganze Raum etwas hell wird, alle Wände sind gut zu sehen. Sie bekommen ihr Licht von der Stelle des Papiers, die von unserem Lichtstrahl getroffen wird. Dass das Papier das Licht in alle Richtungen zurückwirft, erkennt man auch anders: Man sieht die Auftreffstelle des Lichts als hellen Fleck, egal aus welcher Richtung man schaut.

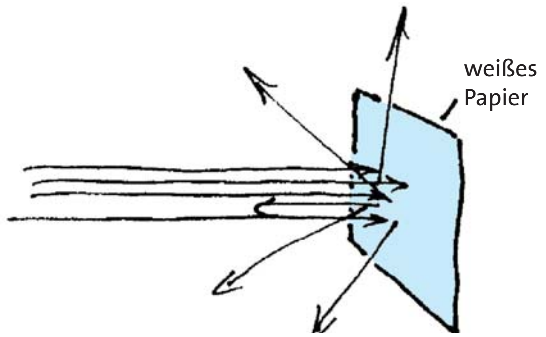


Abb. 21.10 Eine matte, weiße Oberfläche wirft das Licht in alle Richtungen zurück, sie streut das Licht.

Diese Art des Zurückwerfens des Lichts nennt man Streuung. Man sagt, das einfallende Licht werde am Papier gestreut.

Statt auf das Papier lassen wir den Lichtstrahl nun auf einen Spiegel fallen, Abb. 21.11. Wieder wird das ganze Licht zurückgeworfen – diesmal aber nur in eine einzige Richtung. Man erkennt es daran, dass irgendwo an der Wand ein einziger heller Fleck zu sehen ist. Und wieder erkennt man es auf noch eine andere Art: Wenn man auf den Spiegel schaut, ist die Auftreffstelle des Lichts fast nicht zu sehen – außer man schaut aus einer ganz bestimmten Richtung, aus derjenigen Richtung, in die das ganze Licht zurückgeworfen wird. Achtung! In diese Richtung darf man nicht schauen, falls man zum Experimentieren einen Laser benutzt. Der Laserstrahl ist so gut gebündelt, dass er den Augen schadet.

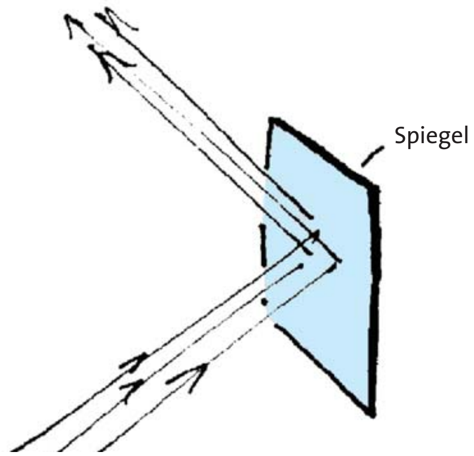


Abb. 21.11 Ein Spiegel wirft das Licht in eine einzige Richtung zurück, er reflektiert das Licht.

Man nennt diese Art des Zurückwerfens von Licht Reflexion.

Transparenz und Streuung

Es gibt Körper, die das Licht geradeaus durchlassen: Zum Beispiel eine Glasscheibe, auf die unser Lichtstrahl senkrecht auftrifft.

Wir halten eine Glasscheibe in einen Lichtstrahl senkrecht zur Strahlrichtung und stellen fest, dass sich der Lichtfleck an der Wand beim Einbringen der Scheibe nicht rührt, Abb. 21.12. Das Glas ist durchsichtig, oder transparent, wie man auch sagt.

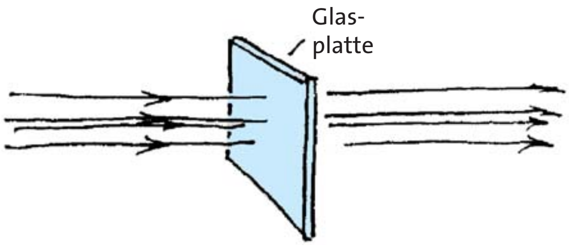


Abb. 21.12 Eine Glasscheibe lässt senkrecht einfallendes Licht gerade durch.

Auch vom Durchlassen des Lichts gibt es eine zweite Variante. Eine Scheibe aus mattem Glas lässt das Licht zum größten Teil durch. Sie streut es aber dabei. Und ein Teil wird auch noch zurückgestreut, Abb. 21.13.

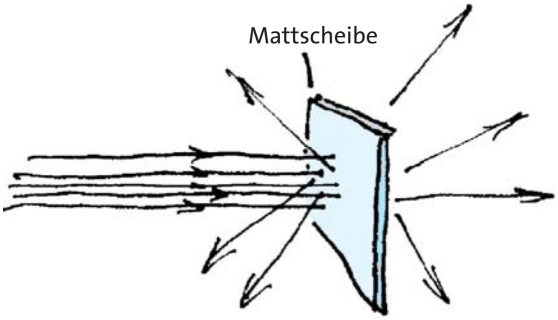


Abb. 21.13 Eine Mattscheibe lässt Licht durch, streut es aber dabei.

Absorption

Wir lassen das Licht nun auf ein Stück schwarzes Papier fallen. Noch besser eignet sich ein schwarzer Wollpullover. Von dem einfallenden Licht kommt fast nichts zurück, und es geht auch nichts hindurch. Das Licht wird von dem Papier bzw. dem Pullover absorbiert.

Kompliziertere Fälle

Wir haben bisher Spezialfälle betrachtet: Das Licht wurde entweder vollständig reflektiert oder vollständig durchgelassen oder vollständig absorbiert. Im Allgemeinen widerfährt dem Licht nicht nur eine dieser Möglichkeiten.

Es wird fast immer ein Teil des Lichts reflektiert, ein Teil zurückgestreut, ein Teil ohne Streuung durchgelassen, ein Teil mit Streuung durchgelassen und ein Teil absorbiert. Je nach Gegenstand sind die verschiedenen Anteile verschieden groß.

Betrachte zum Beispiel ein Blatt graues, glänzendes Papier, Zeitschriftenpapier zum Beispiel, Abb. 21.14. Das Papier wirft einen recht großen Teil des auftreffenden Lichts zurück, und zwar zum Teil gestreut und zum Teil reflektiert. Der reflektierte Teil des Lichts ist für den Glanz des Papiers verantwortlich. Ein weiterer Teil des Lichts wird durchgelassen, und zwar fast ausschließlich gestreut. Der Rest schließlich wird von dem Papier absorbiert. Würde nichts absorbiert, so wäre das Papier weiß und nicht grau.

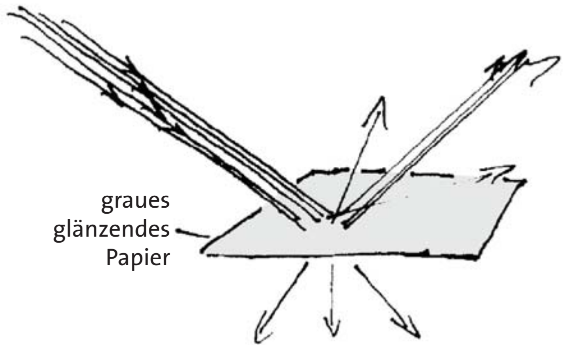


Abb. 21.14 Graues, glänzendes Papier reflektiert, streut und lässt durch.

Es wird aber noch komplizierter. Was mit dem Licht passiert, wenn es auf einen Gegenstand trifft, hängt nämlich auch noch davon ab, unter welchem Winkel es auftrifft.

Während eine Glasscheibe das Licht, das senkrecht auftrifft, zum größten Teil durchlässt, re-

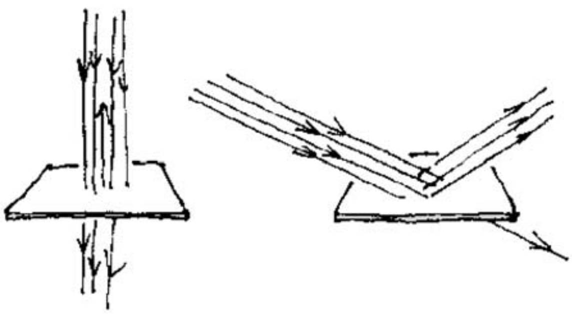


Abb. 21.15 Trifft das Licht senkrecht auf die Glasscheibe, so wird der größte Teil durchgelassen; trifft es flach auf, so wird der größte Teil reflektiert.

flektiert dieselbe Scheibe dasselbe Licht zum größten Teil, wenn es unter einem sehr spitzen Winkel auftrifft, Abb. 21.15. Überzeuge dich davon.

Schließlich ist all das, was wir bisher aufgezählt haben, noch davon abhängig, von welcher Sorte das Licht ist. Und das ist besonders wichtig.

Weißes Licht, d. h. ein Gemisch aus allen Lichtsorten, fällt auf ein T-Shirt. Das T-Shirt absorbiert alle Lichtsorten außer dem blauen Licht, Abb. 21.16. Vom T-Shirt kommt daher nur blaues Licht zurück. Wir sagen: „Das T-Shirt ist blau.“ Was sieht man, wenn man das TShirt mit reinem rotem Licht beleuchtet? Das rote Licht wird absorbiert. Anderes Licht ist nicht vorhanden. Es wird also gar kein Licht zurückgeworfen, das T-Shirt erscheint schwarz.

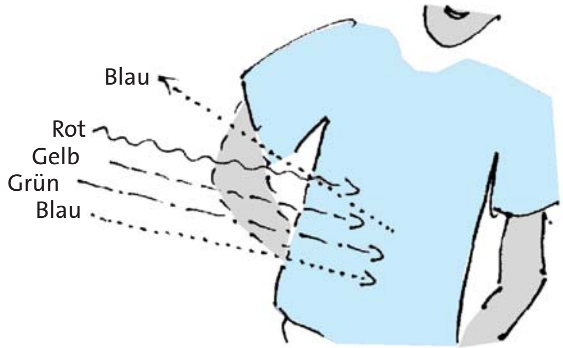


Abb. 21.16 Das T-Shirt absorbiert alles Licht außer dem blauen. Das blaue Licht wird zurückgestreut.

Genauso wie verschiedene Gegenstände verschiedene Lichtsorten verschieden stark zurückwerfen, lassen manche Gegenstände die verschiedenen Lichtsorten auch verschieden gut durch. Hierzu gehören farbige Gläser, Abb. 21.17. Das grüne Glas einer Limonadenflasche lässt grünes Licht durch und absorbiert den Rest.

Es ist interessant, farbige Glasplatten, sogenannte Farbfilter, hintereinander zu halten, Abb. 21.18. Zwei Filter, die je nur eine Lichtsorte durchlassen, aber jedes eine andere, lassen, wenn man sie hintereinander setzt, gar kein Licht mehr durch.

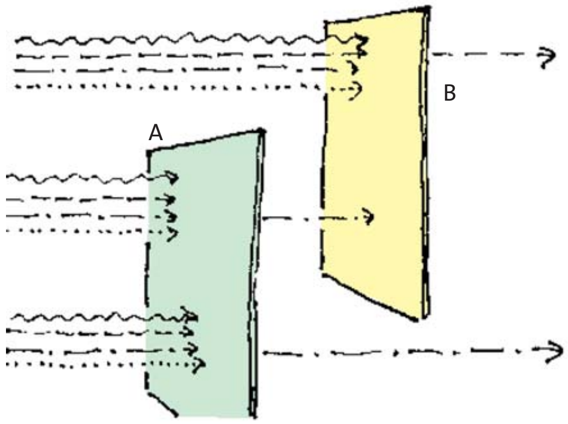


Abb. 21.18 Scheibe A lässt nur grünes Licht durch, Scheibe B nur gelbes. Beide Scheiben hintereinander gestellt lassen gar kein Licht durch.

Interessant, aber recht selten, ist auch die folgende Erscheinung: Ein Gegenstand lässt eine Lichtsorte durch und wirft den Rest zurück. Eine Scheibe mit dieser Eigenschaft ändert ihre Farbe, je nachdem, ob man sie gegen das Licht betrachtet, oder von der Seite, von der das Licht kommt, Abb. 21.19. Dies war ein grober Überblick über die Vielfalt der Erscheinungen, die man beobachten kann, wenn Licht auf einen Gegenstand trifft.

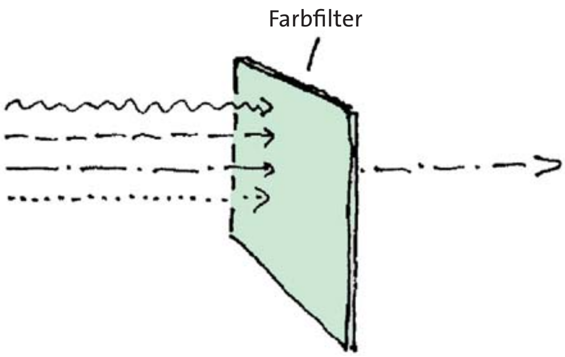


Abb. 21.17 Das Farbfilter absorbiert alles Licht außer dem grünen. Das grüne Licht wird durchgelassen.

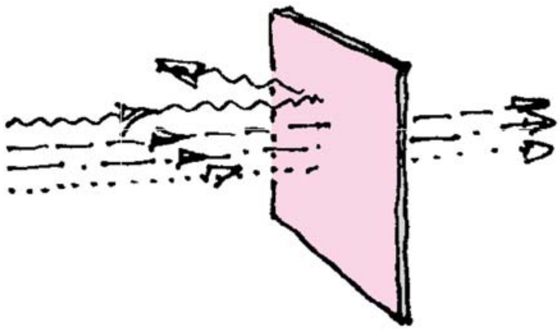


Abb. 21.19 Manche Farbfilter reflektieren das Licht, das sie nicht durchlassen.

Kannst du nun beschreiben, was mit dem Licht der Sonne passiert, das auf einen glänzenden roten Apfel fällt? Oder auf das leicht durchscheinende Blatt eines Baumes?

Aufgaben

1. Das Licht der Sonne trifft auf einen glänzenden roten Apfel. Was passiert mit dem Licht?
2. Das Licht der Sonne trifft auf die leicht durchscheinenden Blätter eines Baumes. Was passiert mit dem Licht?
3. Ein dunkelroter Pullover sieht bei Beleuchtung mit dem blauen Licht einer Reklameleuchtröhre ganz schwarz aus. Wie kommt das?
4. Es gibt silberne Verpackungsfolie, durch die man hindurchschauen kann, wenn man sie gegen das Licht hält. Was passiert mit dem Licht, das auf die Folie trifft?
5. Das Licht der Projektionslampe eines Filmprojektors fällt auf den Film. Was passiert mit dem Licht?
6. Eine farbige Postkarte wird normal beleuchtet. Was passiert mit dem Licht, das auf die Postkarte fällt?
7. Die Bürger von Schilda haben ein Rathaus ohne Fenster gebaut. Damit es im Rathaus hell wird, wollten sie das Licht mit Säcken hineintragen. Warum geht das nicht?

21.4 Diffuses und kohärentes Licht

Wir denken uns irgendwo in der Mitte des Zimmers einen kleinen kugelförmigen Raumbereich R abgegrenzt, Abb. 21.20. Was für Lichtstrahlen gehen durch diesen Raumbereich? Es kommt Licht aus den verschiedensten Richtungen. Von rechts her, vom Fenster, kommt viel; auch von den Wänden kommt noch recht viel. Von unten, vom dunklen Fußboden dagegen, kommt wenig Licht. Irgendwo befindet sich ein ganz schwarzer Gegenstand. Aus dieser Richtung kommt fast gar kein Licht zu unserem Raumbereich.

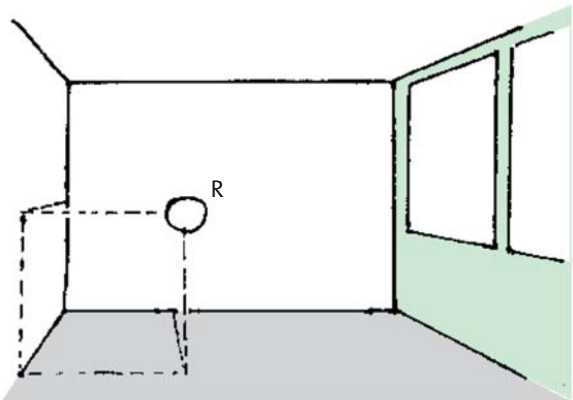


Abb. 21.20 Was für Licht durchkreuzt den kleinen Raumbereich R?

Um das Licht in R vollständig zu beschreiben, genügt es aber nicht, nur zu sagen, wie viel Licht in jeder Richtung läuft. Man muss zusätzlich noch angeben, wie die Lichtsorten verteilt sind. So kommt von der Fensterseite her Licht aller Lichtsorten, während von den blau gestrichenen Wänden nur blaues Licht zu unserem Raumbereich kommt.

Wir betrachten einige spezielle Situationen.

Es ist ein trüber Tag. Wir gehen mitsamt unserem Raumbereich R nach draußen. In Abb. 21.21 ist R vergrößert und im Querschnitt dargestellt. Es sind viele typische Lichtstrahlen eingezeichnet. Strahlen unterschiedlicher Lichtsorten sind durch unterschiedliche Strichelung gekennzeichnet. Man sieht: Es kommt Licht von links, von rechts, von oben, kurz, aus allen Richtungen des „oberen Halbraums". Wenn sich an einem Ort Licht vieler verschiedener Richtungen befindet, sagt man, das Licht sei dort diffus.

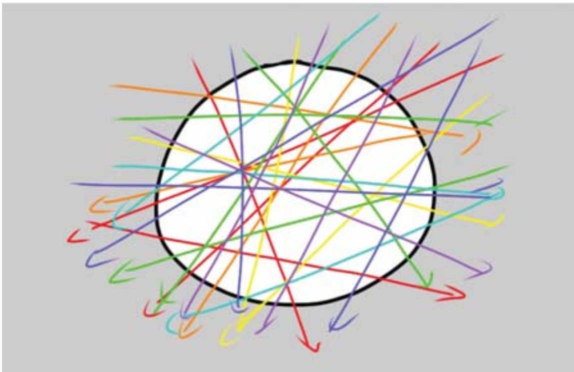


Abb. 21.21 Diffuses Licht verschiedener Farben

Wir stellen uns nun vor, über der Wolkendecke liege ein riesiges Farbfilter. Auf der Erde kommt dann nur noch Licht einer Sorte an. Das Licht, das wir in unserem Bereich R hätten, ist in Abb. 21.22 dargestellt. Es ist immer noch diffus. Im Gegensatz zu vorher besteht es aber nur noch aus einer Lichtsorte. Man sagt es ist monochromatisch.

Eine weitere einfache Situation: Es ist Nacht, und es gibt nur eine einzige Lampe, die weit von uns, und damit von R, entfernt ist, Abb. 21.23.

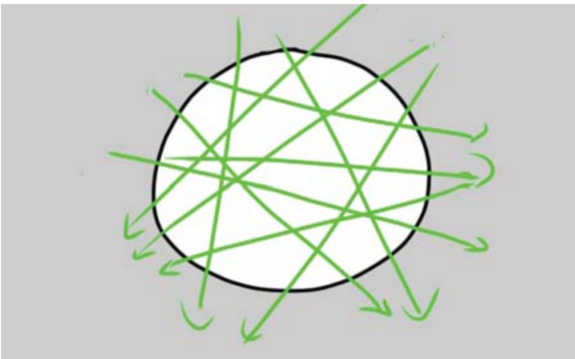


Abb. 21.22 Diffuses, monochromatisches Licht

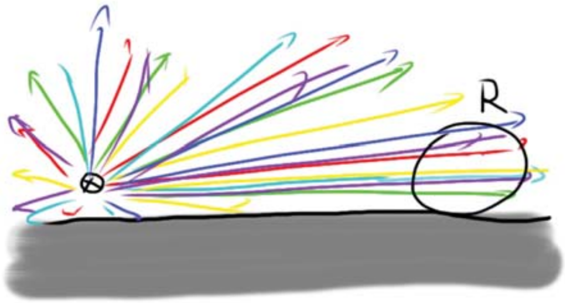


Abb. 21.23 Das Licht im Raumbereich R hat eine einheitliche Richtung.

Abb. 21.24 zeigt die Lichtverteilung in R. Alle Lichtstrahlen haben jetzt nahezu dieselbe Richtung.

Schließlich stellen wir vor die Lichtquelle noch ein Farbfilter. Das Licht, das durch R läuft, zeigt Abb. 21.25. Es ist monochromatisch und hat eine einzige Richtung. Es ist das reinste Licht, das man sich überhaupt vorstellen kann. Es ist weder ein Gemisch verschiedener Lichtsorten wie in Abb. 21.24, noch ist es ein Gemisch von Licht verschiedener Richtungen wie in Abb. 21.22 . Und es ist schon gar nicht ein Gemisch verschiedener Sorten und Richtungen gleichzeitig wie in Abb. 21.21.

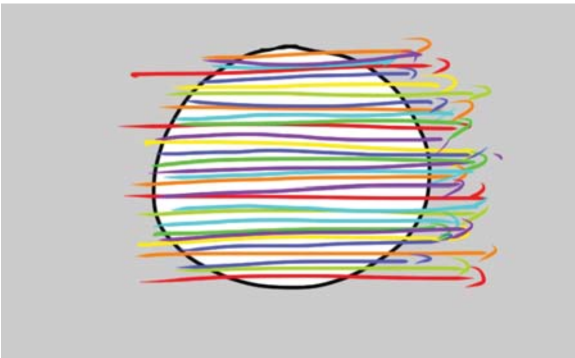


Abb. 21.24 Licht einheitlicher Richtung

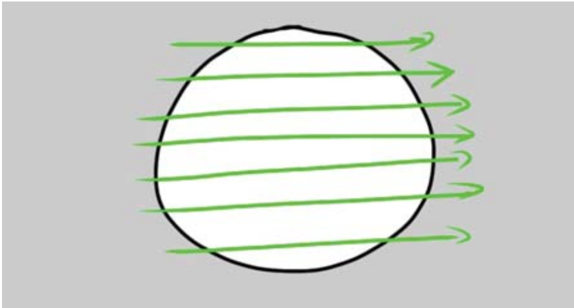


Abb. 21.25 Kohärentes Licht: Einheitliche Richtung und einheitliche Farbe

Solches Licht, das sowohl von der Lichtsorte als auch von der Richtung her völlig einheitlich ist, nennt man kohärentes Licht. Es ist zum Experimentieren besonders gut geeignet.

> Kohärentes Licht: eine einzige Lichtsorte, eine einzige Richtung.

Wie man sich kohärentes Licht beschaffen kann, sollte dir nach den vorangegangenen Betrachtungen klar sein. Entweder man stellt eine sehr kleine Lichtquelle, vor die man ein Farbfilter setzt, in sehr großer Entfernung auf. Oder man macht es so wie es Abb. 21.26 zeigt: Man stellt die Lichtquelle nicht in großer Entfernung auf, blendet dafür aber die „falschen" Richtungen aus.

Nach beiden Methoden bekommt man zwar kohärentes Licht, aber Licht, das nur sehr schwach

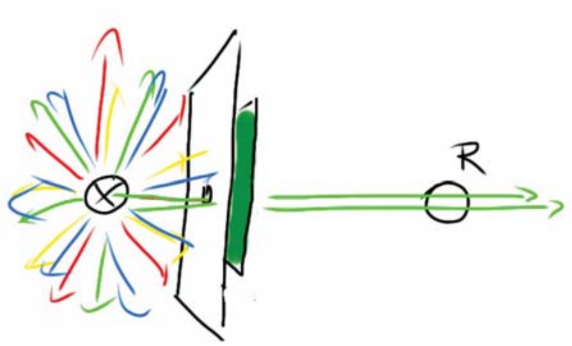


Abb. 21.26 So kann man kohärentes Licht herstellen.

ist, Licht sehr geringer Intensität. Es gibt nun eine viel elegantere Methode, um sich kohärentes Licht zu beschaffen, und zwar Licht sehr hoher Intensität: Man nimmt als Lichtquelle einen Laser. Das Licht von Lasern zeichnet sich dadurch aus, dass es von Natur aus kohärent ist. Wir wissen jetzt also auch, was das Besondere am Laserlicht ist:

> Laserlicht ist kohärent.

Aufgaben

1. Es herrscht Nebel, sodass man „die Hand vor den Augen nicht sieht“. Wie sieht die Lichtverteilung in einem kleinen Raumbereich mitten im Nebel aus?
2. Auf eine Straßenkreuzung kommen nachts aus großer Entfernung zwei Autos im rechten Winkel aufeinander zu. Wie ist die Lichtverteilung im Bereich der Kreuzung (von oben gesehen)?
3. Du stehst auf der Straße. Es ist dunkel. Du siehst vor dir in sehr großer Entfernung die Rücklichter eines Autos. Wie ist die Lichtverteilung direkt vor dir?

21.5 Das Reflexionsgesetz

Wir richten einen Lichtstrahl auf einen Spiegel. Das Licht wird reflektiert; es wird in eine bestimmte, andere Richtung abgelenkt. Wovon hängt diese Richtung ab? Wie kann man sie verändern?

Man sieht leicht, dass der reflektierte Lichtstrahl umso flacher ausläuft, je flacher der einfallende Strahl auf den Spiegel trifft. Wenn man die Winkel nachmisst, den Einfallswinkel und den Reflexionswinkel, so stellt man fest, dass beide gleich sind, Abb. 21.27.

Bei derselben Gelegenheit stellt man noch fest, dass einfallender und reflektierter Strahl in einer Ebene liegen, die senkrecht auf der Spiegeloberfläche steht. Wir errichten an der Auftreffstelle auf den Spiegel die Senkrechte auf die Spiegeloberfläche, das Einfallslot. Es gilt damit:

> Einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Einfallslot liegen in einer Ebene.
> Einfallswinkel = Reflexionswinkel

Diese Aussagen nennt man das Reflexionsgesetz.

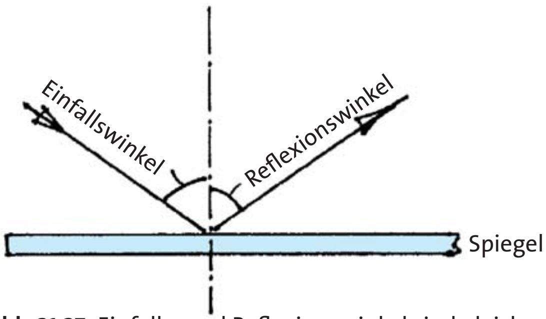


Abb. 21.27 Einfalls- und Reflexionswinkel sind gleich.

Aufgaben

1. Abb. 21.28a zeigt von oben gesehen zwei ebene Spiegel, die einen rechten Winkel bilden. Von links unten fällt paralleles Licht ein. Zeichne den weiteren Verlauf der Strahlen A und B.
2. Abb. 21.28b zeigt eine gekrümmte spiegelnde Fläche, auf die Licht aus einer einheitlichen Richtung trifft. Das Einfallslot liegt für jeden Punkt der Fläche in der Zeichenebene. Zeichne den weiteren Verlauf der Strahlen A und B.

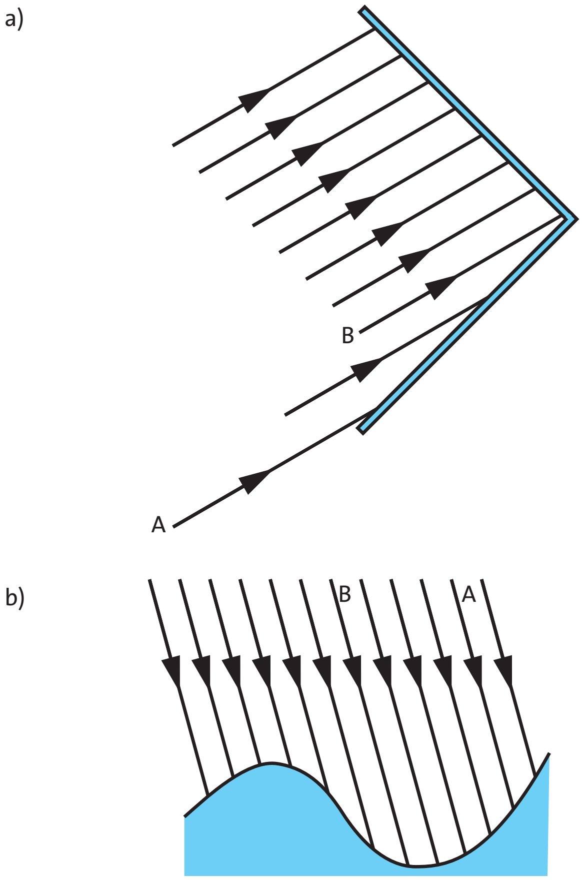


Abb. 21.28 Zu den Aufgaben 1 und 2

21.6 Der ebene Spiegel

Abb. 21.29 zeigt einen Spiegel, vor dem eine Flasche steht. Man sieht die Flasche vor dem Spiegel, und man sieht eine zweite Flasche, die hinter dem Spiegel zu stehen scheint. Die „Phantom-Flasche" hinter dem Spiegel befindet sich genau in der Verlängerung der Senkrechten, die man von der richtigen Flasche auf den Spiegel zeichnen kann. Wie kommt diese Erscheinung, dieses „Spiegelbild", zustande?

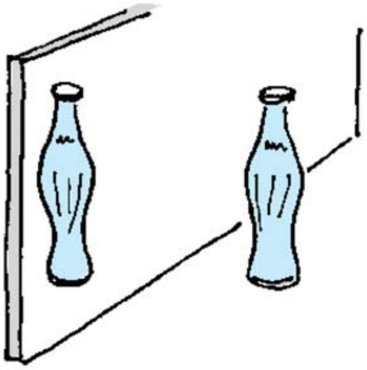


Abb. 21.29 Hinter dem Spiegel scheint eine zweite Flasche zu stehen.

Um es zu verstehen, genügt es, das Reflexionsgesetz anzuwenden. P sei ein bestimmter Punkt eines Gegenstandes. Von P geht Licht aus, und zwar in die verschiedensten Richtungen. In Abb. 21.30 sind drei der vielen Strahlen, die von P ausgehen, eingezeichnet. Alle drei Strahlen treffen auf den Spiegel. Außerdem sind die entsprechenden reflektierten Strahlen eingezeichnet. Verlängert man nun die reflektierten Strahlen nach hinten — siehe die gestrichelten Linien —, so treffen sie

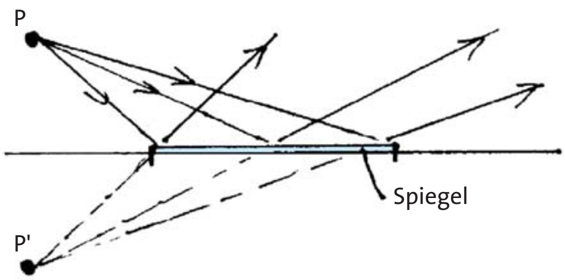


Abb. 21.30 Die reflektierten Lichtstrahlen scheinen vom Punkt P' zu kommen.

sich in einem Punkt P'. Die reflektierten Strahlen kommen vom Spiegel, und zwar von den verschiedenen Punkten A, B und C der Spiegeloberfläche. Sie scheinen aber alle von einem einzigen Punkt P' auszugehen, der hinter dem Spiegel liegt.

In Abb. 21.31 wurde der Spiegel durch eine Fensteröffnung ersetzt. Und dort, wo in Abb. 21.30 der lichtaussendende Punk P' zu liegen scheint, befindet sich in Abb. 21.31 wirklich ein lichtaussendender Punkt. Das Licht, das in Abb. 21.31 aus der Fensteröffnung kommt, ist nicht zu unterscheiden von dem, das in Abb. 21.30 vom Spiegel kommt.

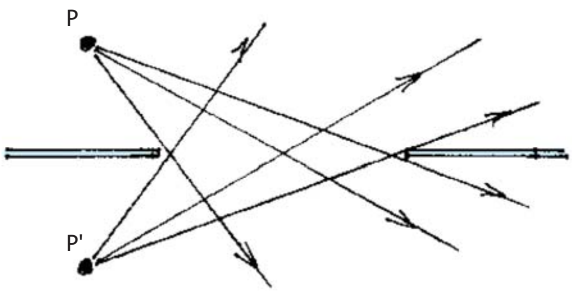


Abb. 21.31 Die Lichtverteilung oberhalb des Fensters ist dieselbe wie die in Abb. 21.30 oberhalb des Spiegels.

Aufgabe

1. Abb. 21.32 zeigt einen Spiegel von oben gesehen und einen stabförmigen Gegenstand. Bestimme die Lage des scheinbaren Gegenstandes hinter dem Spiegel. Zeichne Strahlen ein.

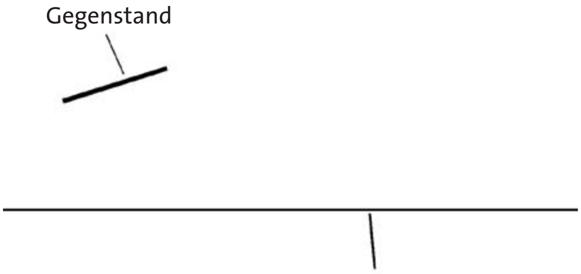


Abb. 21.32 Zur Aufgabe 1

21.7 Parabolspiegel

Oft braucht man sehr viel Licht an einer einzigen Stelle. Man möchte Licht, das sehr weit verteilt ankommt, auf einen kleinen Raumbereich konzentrieren. Um zu sehen, wie man das erreicht, betrachten wir ein Beispiel.

Der Kessel eines Kraftwerks soll mit Sonnenlicht geheizt werden. Stellt man den Kessel einfach in die Sonne, so wird er kaum warm, es trifft viel zu wenig Sonnenlicht auf. Man müsste das Sonnenlicht, das auf einen größeren Teil der Erdoberfläche trifft, irgendwie aufsammeln. Man schafft dies mitilfe von Spiegeln, Abb. 21.33.

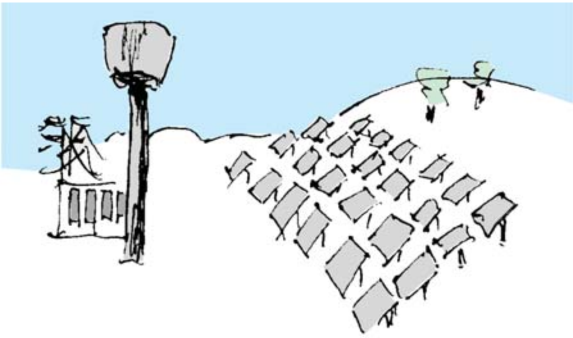


Abb. 21.33 Solarkraftwerk: Die Spiegel konzentrieren das Sonnenlicht auf den Kessel am oberen Ende des Turms.

Jeder Spiegel ist so orientiert, dass das von ihm zurückgeworfene Sonnenlicht gerade auf den Kessel fällt. Damit man Licht von einer möglichst großen Fläche nutzen kann, wird der Kessel auf einem Turm installiert. Daher der Name Turmkraftwerk.

Im Prinzip könnte man statt der vielen Einzelspiegel einen einzigen großen, zusammenhängenden Spiegel aufbauen, Abb. 21.34. Ein so riesiger Spiegel, wie er für ein Kraftwerk gebraucht wird, ist natürlich unpraktisch, und er brächte auch keinen Vorteil. Die Methode ist aber sehr interessant für kleine Anordnungen.

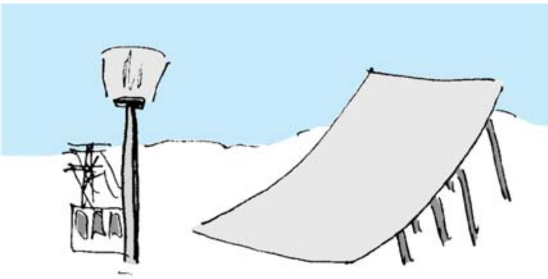


Abb. 21.34 Man könnte die einzelnen Spiegel in Abb. 21.33 durch einen einzigen, gewölbten Spiegel ersetzen.

Wenn Licht aus einer einzigen Richtung kommt, wenn es sich also um paralleles Licht handelt, so kann man es mit einem Spiegel in einen einzigen Punkt konzentrieren, vorausgesetzt, der Spiegel hat die richtige Form: Seine Oberfläche muss im Querschnitt eine Parabel sein. Man nennt solche Spiegel Parabolspiegel.

Licht, das parallel zur Symmetrieachse der Parabel einfällt, wird so reflektiert, dass es sich in einem Punkt trifft. Dieser Punkt heißt der Brennpunkt des Spiegels.

Da das Sonnenlicht nicht ganz parallel ist, wird es nicht in einem Punkt konzentriert, sondern in einem kleinen Fleck.

Man kann mit einem Parabolspiegel paralleles Licht in einen einzigen Punkt konzentrieren. Aber man kann den Spiegel auch umgekehrt betreiben, nämlich um Licht, das von einem Punkt ausgeht, parallel zu machen.

Wir nehmen eine Lichtquelle, die „so punktförmig wie möglich“ ist, eine Glühlampe mit einem sehr kompakten Glühdraht zum Beispiel. Wir stellen die Lampe so auf, dass sich der Glühdraht im Brennpunkt eines Parabolspiegels befindet. Der Spiegel wirft das Licht, das auf ihn trifft, so zurück, dass es (fast) parallel ist. Was wir aufgebaut haben, ist ein Scheinwerfer, ähnlich wie ihn jedes Auto hat, oder auch jede Taschenlampe.

Parabolspiegel haben noch viele andere Anwendungen. Sie werden in beiden Richtungen gebraucht: zum Konzentrieren von parallelem Licht auf einen Punkt und zum Parallelmachen von Licht, das von einer sehr kleinen, also praktisch punktförmigen Quelle ausgeht. Sehr häufig werden sie für Licht benutzt, das weit außerhalb des Empfindlichkeitsbereichs unserer Augen liegt. Man braucht solche Spiegel sowohl für Sende- als auch für Empfangsantennen der verschiedensten Arten elektromagnetischer Wellen.

Der Parabolspiegel der Sendeantenne erzeugt aus der Strahlung der eigentlichen, praktisch punktförmigen Antenne einen Strahl von relativ parallelem „Licht“, und der Spiegel der Empfangsantenne sammelt die einfallende Strahlung wieder auf und konzentriert sie auf die kleine Empfangsantenne.

Solche Sende- und Empfangsantennen befinden sich auf jedem Fernmeldeturm. Mit ihnen werden Fernsehprogramme, Hörfunkprogramme und Telefongespräche von einem Turm zum nächsten übertragen.

Parabolantennen werden außerdem benutzt, um Daten zu Satelliten zu schicken und von Satelliten zu empfangen. Auch zum Direktempfang des Satellitenfernsehens benutzt man eine Antenne mit Parabolspiegel.

Der Parabolspiegel des Radars am Flughafen dient gleichzeitig zum Senden und zum Empfangen, Abb. 21.35.

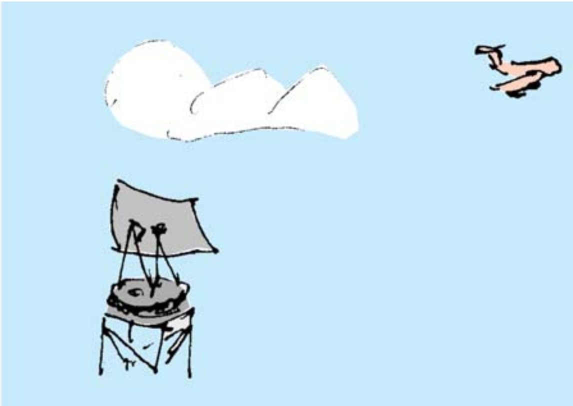


Abb. 21.35 Radarantenne

Er erzeugt einen relativ dünnen Strahl elektromagnetischer Wellen. Da sich die Antenne dreht, läuft der Strahl im Kreis herum. Das „Licht“, das er aussendet, wird nur von Metallen zurückgeworfen. Trifft der Strahl etwa auf ein Flugzeug, so wird Strahlung zurückgeworfen, vom Parabolspiegel konzentriert und von der Antenne im Brennpunkt aufgefangen. Man erfährt so, in welcher Richtung sich das Flugzeug befindet.

Zurück zum gewöhnlichen Licht.

Was macht unser Spiegelfeld in Abb. 21.33 bei trübem Wetter? Wir betrachten einen einzigen Spiegel. Er wirft das einfallende Licht einer einzigen Richtung auf den Kessel. Das meiste einfallende Licht wird aber in andere Richtungen gelenkt, es ist verloren. Wie man den Spiegel auch dreht – das meiste Licht geht daneben.

Das gilt auch für den Parabolspiegel. Es gibt überhaupt keinen Spiegel, mit dem man diffuses Licht konzentrieren kann.

Diffuses Licht kann man nicht konzentrieren.

Aufgabe

1. Der Parabolspiegel in Abb. 21.36 wird von diffusem Licht getroffen. Zeige, dass der Spiegel das Licht nicht konzentriert und nicht parallel macht.

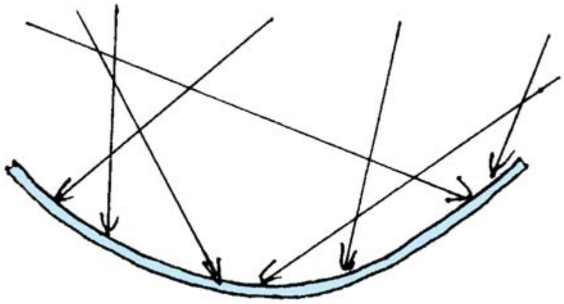


Abb. 21.36 Zur Aufgabe 1

21.8 Lichtbrechung

Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen braucht man einen dünnen Lichtstrahl.

Wir füllen ein Aquarium mit Wasser und geben in das Wasser einige Tropfen Milch. Dadurch wird das Wasser etwas trüb. Wenn jetzt der Lichtstrahl durch das Wasser läuft, sieht man gut, welchen Weg er nimmt.

Wir schicken den Strahl von oben her in das Wasser hinein, Abb. 21.37. Die wichtigste Feststellung: Beim Eintritt ins Wasser wird der Strahl geknickt – außer wenn er genau senkrecht auf die Wasseroberfläche fällt. Je schräger er auftrifft, desto stärker wird er geknickt, und zwar immer von der Wasseroberfläche weg.

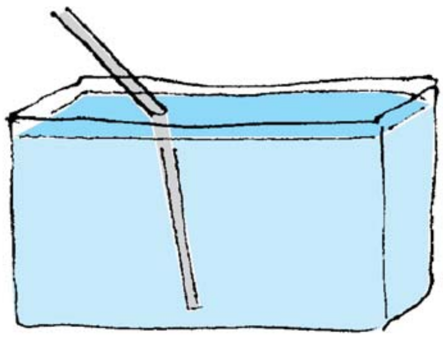


Abb. 21.37 Das Lichtbündel wird an der Wasseroberfläche geknickt.

Dieses Abknicken von Lichtstrahlen nennt man Brechung. Man sagt, das Licht werde gebrochen.

In Abb. 21.38 sind einfallender und gebrochener Strahl noch einmal dargestellt. Außerdem ist bei der Auftreffstelle noch das Einfallslot eingezeichnet. Den Winkel des einfallenden Strahls gegen das Lot bezeichnen wir mit α; der Winkel zwischen gebrochenem Strahl und Lot ist β.

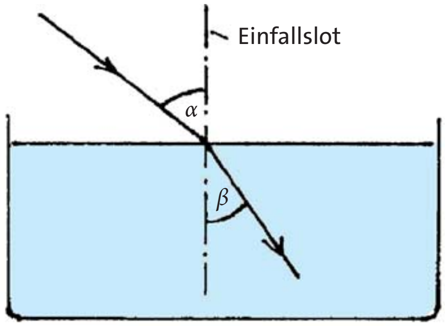


Abb. 21.38 Beim Eintritt in Wasser wird das Licht zum Einfallslot hin gebrochen.

Wir können damit sagen, dass das Licht beim Übergang Luft → Wasser zum Einfallslot hin gebrochen wird. Wir stellen auch fest, dass einfallender und gebrochener Strahl in einer Ebene liegen, die senkrecht auf der brechenden Fläche steht. In anderen Worten: Einfallender Strahl, gebrochener Strahl und Einfallslot liegen in einer Ebene.

Auch wenn der Lichtstrahl aus der Luft in einen anderen durchsichtigen Körper eintritt, wird er gebrochen. Wie stark er gebrochen wird, hängt vom Material ab. Beim Übergang in Glas wird das Licht stärker gebrochen als beim Übergang in Wasser. Und beim Übergang in Diamant stärker als beim Übergang in Glas.

In Tab. 21.1 ist der Zusammenhang zwischen α und β für Wasser, Glas und Diamant wiedergegeben.

Es bleiben noch einige Fragen zu klären.

Was passiert mit Licht, das vom Wasser in die Luft übertritt? Statt die Lichtquelle in das Wasserbecken hineinzustellen – das würde ihr sicher nicht gut tun – wenden wir einen Trick an. Wir schicken den Lichtstrahl von draußen ins Wasser hinein und stellen im Wasser einen Spiegel so auf, dass er vom Lichtstrahl senkrecht getroffen wird. Der Lichtstrahl wird also im Wasser in sich selbst

α Luft	Wasser	β Glas	Diamant
0°	0°	0°	0°
10°	7,5°	6,6°	4,1°
20°	14,9°	13,2°	8,1°
30°	21,1°	19,5°	11,9°
40°	28,9°	25,4°	15,4°
50°	35,2°	30,7°	18,5°
60°	40,6°	35,3°	21,0°
70°	45,0°	38,8°	22,8°
80°	47,8°	41,0°	24,0°
90°	48,8°	41,8°	24,4°

Tab. 21.1 Zusammenhang zwischen den Winkeln α und β für Wasser, Glas und Diamant

zurückgeworfen. Was passiert nun mit dem zurücklaufenden Strahl an der Wasseroberfläche? Der Versuch zeigt es eindeutig: Er wird wieder zurückgebrochen – in genau die Richtung, aus der er gekommen war, Abb. 21.39.

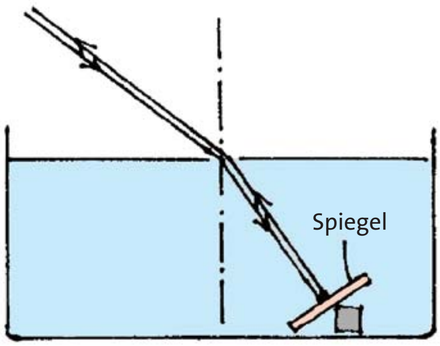


Abb. 21.39 Beim Austritt aus dem Wasser wird der Lichtstrahl wieder zurückgeknickt.

Also: Beim Eintritt ins Wasser wird das Licht zum Einfallslot hin, beim Austritt aus dem Wasser vom Einfallslot weg gebrochen.

Das Entsprechende gilt für andere durchsichtige Stoffe. Wir können daraus auch schließen, was mit einem Lichtstrahl passiert, der durch eine Glasplatte schräg hindurchläuft, Abb. 21.40. Beim Eintritt wird er zum Lot hin, beim Austritt vom Lot weg gebrochen. Insgesamt wird er also einfach parallel versetzt.

Was geschieht aber mit Licht, das nicht aus der Luft, sondern aus einem anderen Medium in Glas eintritt? In einem speziellen Fall ist die Frage leicht zu beantworten: für Licht, das von Glas

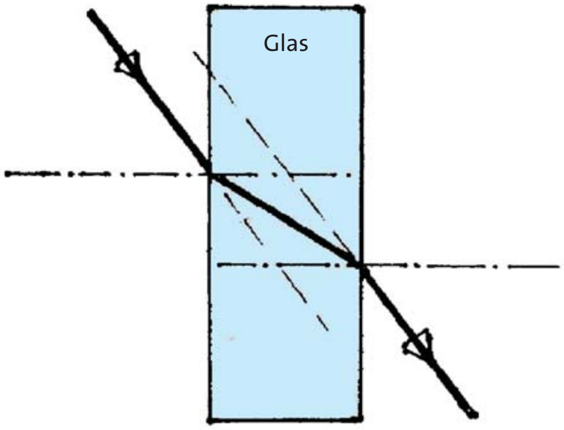


Abb. 21.40 Beim Durchqueren einer Glasplatte wird der Lichtstrahl parallel versetzt.

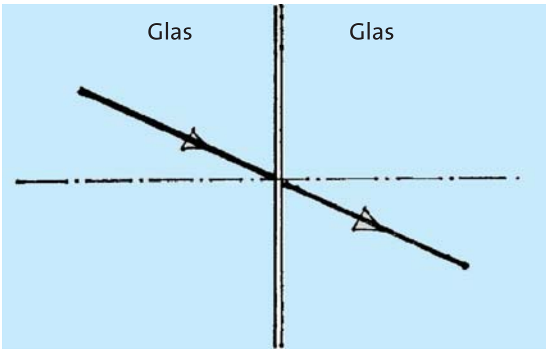


Abb. 21.41 Beim Übergang von Glas in Glas ändert sich die Richtung des Lichts nicht.

kommt und in Glas eintritt, Abb. 21.41. Beim Austritt aus dem linken Glasklotz wird es vom Lot weg geknickt. Sofort darauf, beim Eintritt in den rechten Klotz wird es wieder in die alte Richtung zurück geknickt. Insgesamt passiert ihm also gar nichts.

Wir wissen also inzwischen:

- Übergang Luft → Glas: starke Brechung;
- Übergang Glas → Glas: keine Brechung.

Der Übergang Wasser → Glas liegt gerade zwischen diesen beiden Fällen: Das Licht wird nicht so stark gebrochen, wie wenn es aus der Luft kommt, aber stärker als wenn es aus Glas kommt. Wir haben also:

- Übergang Wasser → Glas: schwache Brechung.

Wir sagen von den verschiedenen durchsichtigen Stoffen, sie haben eine unterschiedliche optische Dichte. Von den drei Stoffen in Tabelle 21.1 ist Diamant der optisch dichteste. Es folgt Glas und dann Wasser. Eine noch geringere optische Dichte hat Luft. Und eine noch etwas geringere hat der luftleere Raum, das Vakuum. Der Unterschied der optischen Dichten von Luft und Vakuum ist aber sehr gering.

Wir haben also die Regel:

> Beim Übergang von einem Material A in ein Material B wird das Licht zum Lot hin gebrochen, wenn die optische Dichte von B größer ist als die von A. Es wird vom Lot weg gebrochen, wenn die optische Dichte von B kleiner ist als die von A.

Die optische Dichte von Luft (und aller anderen Gase) hängt übrigens von ihrer gewöhnlichen Dichte (Masse pro Volumen) ab. Die gewöhnliche Dichte kann man leicht ändern, indem man die Luft erwärmt. Darauf beruht der in Abb. 21.42 dargestellte Versuch.

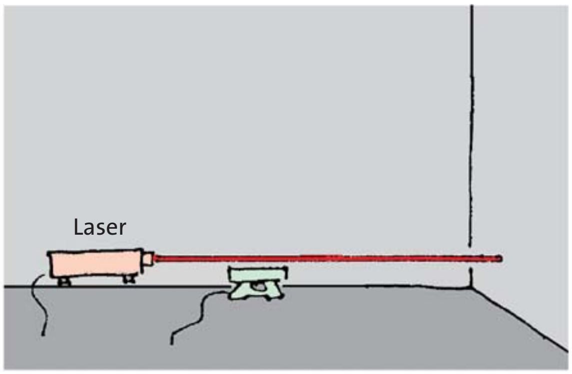


Abb. 21.42 Die heiße Luft über der Kochplatte hat eine geringere Dichte als die Luft der Umgebung. Damit ist auch ihre optische Dichte geringer.

Ein Laserstrahl läuft sehr dicht über einer heißen Kochplatte entlang und trifft irgendwo auf die Wand. Pustet man nun etwas über die Kochplatte hinweg (Achtung! Nicht in den Strahl schauen!), so bewegt sich der Lichtfleck an der Wand. Es sieht so aus, als blase man den Laserstrahl weg. Tatsächlich bläst man nur die heiße Luft weg. Damit verschwinden die Übergänge zwischen heißer und kalter Luft, die eine geringe Brechung des Laserstrahls verursacht hatten.

Die unterschiedliche optische Dichte und die damit verbundene Lichtbrechung ist auch die Ursache dafür, dass Gegenstände zu flimmern scheinen, wenn man sie dicht über einen Heizkörper hinweg betrachtet.

Aufgaben

1. Stelle den Zusammenhang zwischen α und β für Wasser, Glas und Diamant in einem α-β-Koordinatensystem dar.
2. Abb. 21.43a zeigt einen Lichtstrahl, der aus Luft in Glas eintritt. Zeichne den gebrochenen Strahl ein. In Abb. 21.43b tritt wieder ein Lichtstrahl von Luft in Glas über. Hier ist aber nur der gebrochene Strahl dargestellt. Zeichne den einfallenden Strahl ein.

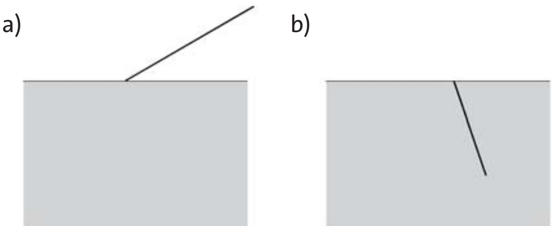


Abb. 21.43 Zu Aufgabe 2

21.9 Das Prisma

Wir hatten im vorigen Abschnitt gesehen: Ein Lichtstrahl, der auf eine Glasplatte (mit parallelen Oberflächen) trifft, wird parallel zur Seite versetzt, Abb. 21.40. Wir ändern nun die Situation etwas ab. Der Lichtstrahl soll einen Glaskörper durchqueren, der durch ebene Flächen begrenzt wird, die nicht mehr parallel zueinander liegen. Der einfachste Körper dieser Art ist ein Prisma mit dreieckiger Grundfläche, Abb. 21.44.

Der Strahl wird zweimal gebrochen: beim Eintritt ins Prisma und beim Austritt aus dem Prisma. Alle Strahlen und Einfallslote liegen in einer Ebene, die parallel ist zur Grundfläche des Prismas. Diese Ebene ist in Abb. 21.45 dargestellt.

Man sieht, dass das Licht, welches das Prisma verlässt, nicht dieselbe Richtung hat wie das eintretende Licht (anders als bei der Glasplatte). Es erfährt vielmehr eine Nettoablenkung.

Wie stark diese Gesamtablenkung ist, hängt davon ab, unter welchem Winkel das Licht auf das Prisma trifft.

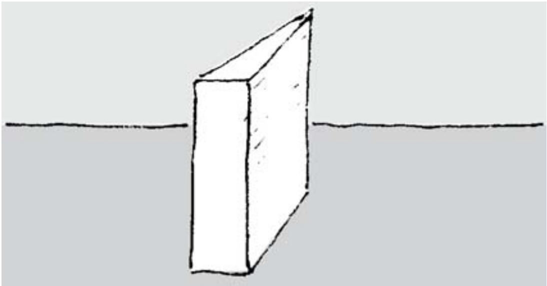


Abb. 21.44 Prisma mit dreieckiger Grundfläche

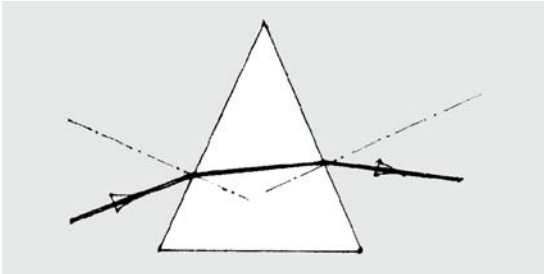


Abb. 21.45 Nach zweimaliger Brechung des Lichtstrahls bleibt eine Nettoablenkung übrig.

Wir hatten früher schon davon Gebrauch gemacht, dass ein Prisma Licht unterschiedlicher Wellenlänge (verschiedene Lichtsorten) verschieden stark ablenkt.

Aufgaben

1. Ein Glasprisma hat als Grundfläche ein gleichseitiges Dreieck, Abb. 21.46. Von links fällt Licht einer einheitlichen Richtung auf das Prisma. Bestimme die Richtung des auslaufenden Lichts.
2. Zwei gleich gebaute Prismen werden hintereinander aufgestellt, Abb. 21.47. In welche Richtung läuft das Licht, nachdem es beide Prismen durchquert hat?

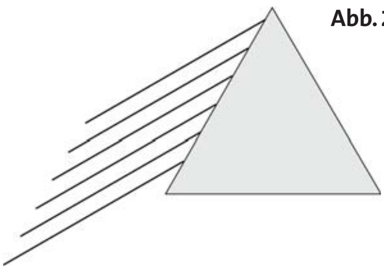


Abb. 21.46 Zu Aufgabe 1

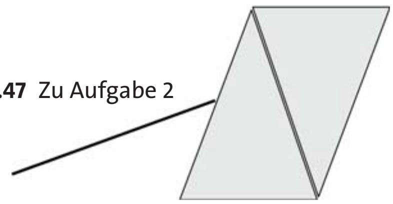


Abb. 21.47 Zu Aufgabe 2

21.10 Totalreflexion

Tab. 21.1 zeigt, dass ein Lichtstrahl, der unter einem Winkel α von fast 90° in Wasser eintritt, im Wasser unter dem Winkel 48,8° gegen das Lot weiterläuft. Diese Zahlen bedeuten auch, dass ein Lichtstrahl, der unter dem Winkel 48,8° vom Innern des Wassers auf die Wasseroberfläche trifft, außerhalb des Wassers praktisch parallel zur Wasseroberfläche läuft. Was passiert aber mit einem Lichtstrahl, der aus dem Innern des Wassers noch flacher gegen die Oberfläche läuft? Er kann gar nicht mehr austreten. Er wird ins Innere zurückreflektiert, und zwar so, wie es das Reflexionsgesetz verlangt, Abb. 21.48. Man nennt diese Erscheinung Totalreflexion.

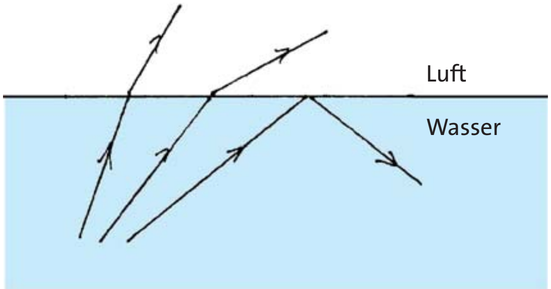


Abb. 21.48 Licht, das von innen auf die Wasseroberfläche trifft, wird totalreflektiert wenn der Einfallswinkel größer als 48,8° ist.

Diese Reflexion setzt aber nicht plötzlich ein, wenn der Winkel β den Wert 48,8° erreicht. Es wird ja stets nur ein Teil des Lichts an der Grenzfläche gebrochen; der Rest wird reflektiert. Und je steiler das Licht einfällt, je kleiner der Winkel gegen das Lot ist, desto weniger wird reflektiert.

Eine wichtige Anwendung der Totalreflexion stellen die Lichtleiter dar. Ein Lichtleiter ist eine lange flexible Glasfaser. Licht, das am einen Ende unter kleinem Winkel gegen das Lot eintritt, Abb. 21.49, kann den Lichtleiter seitlich nicht verlassen, es wird totalreflektiert. Es läuft also im Zickzack durch den Lichtleiter und folgt dabei seinen Krümmungen. Am anderen Ende tritt es wieder aus.

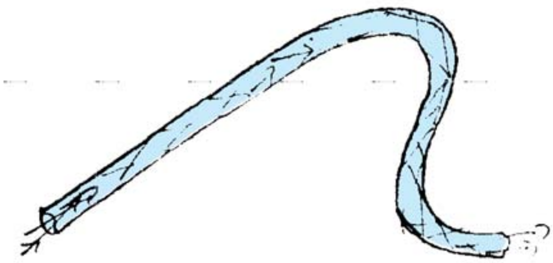


Abb. 21.49 Lichtleiter

Das Bemerkenswerte an der technischen Realisierung von Lichtleitern ist, dass man es geschafft hat, Glassorten herzustellen, in denen das Licht mehrere hundert Meter ohne große Verluste durch Absorption laufen kann. Bedenke, dass von dem Licht, das auf die Meeresoberfläche fällt, in etwa 300 m Tiefe praktisch nichts mehr übrig ist. In dieser Tiefe ist es stockfinster — auch wenn das Meer sehr sauber ist.

Aufgaben

1. Wie ist der weitere Verlauf des Lichts in Abb. 21.50? Berücksichtige, dass manchmal ein Teil des Lichts gebrochen, ein anderer Teil reflektiert wird.
2. Ein Lichtstrahl trifft auf einen zylindrischen Glasstab, Abb. 21.51. Zeichne den weiteren Verlauf des Strahls.

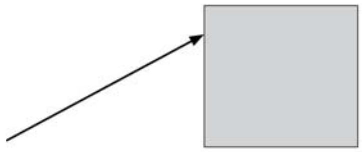


Abb. 21.50 Zu Aufgabe 1

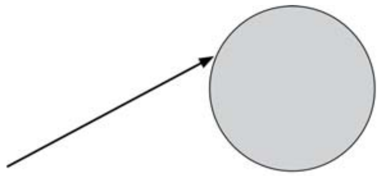


Abb. 21.51 Zu Aufgabe 2

22 DIE OPTISCHE ABBILDUNG

22.1 Was ist ein Bild?

Das Licht war uns begegnet als Energieträger. Mit dem Licht kommt Energie von der Sonne zur Erde. Ohne Sonnenlicht wäre es auf der Erde so kalt, dass kein Leben möglich wäre.

Das Licht war uns auch begegnet als Datenträger. Sowohl in der Natur als auch in der Technik wird es als Datenträger genutzt. Menschen und Tiere bekommen über ihre Augen mit dem Licht große Datenmengen. Sie brauchen diese Daten, um sich in der Welt zurechtzufinden. Technisch wird das Licht als Datenträger benutzt:

- in Lichtleitern, um große Datenmengen von einer Stelle zu einer anderen zu transportieren;
- um die Musik von einer CD herunterzulesen.

Es gibt aber noch einen weiteren technischen Bereich, der es mit dem Licht als Datenträger zu tun hat, und der so groß und wichtig ist, dass er sich zu einem eigenen Fachgebiet entwickelt hat: die Optik. Wichtigstes Ziel der Optik ist es, sogenannte optische Abbildungen zu machen. Bevor wir beginnen, optische Abbildungen zu untersuchen, wollen wir die Frage beantworten, was ein Bild ist. Die Antwort darauf ist nicht so einfach, wie du vielleicht denkst.

Ist ein Bild ein Gegenstand, ein Ding? Es scheint so. Ein Gemälde, ein Foto, eine Zeichnung zum Beispiel sind Bilder. Diese Bilder bleiben Bilder, auch wenn man sie ins Dunkle bringt, sodass man sie nicht mehr sehen kann. Das Passbild bleibt Passbild, auch wenn der Pass in der Tasche steckt.

Wir betrachten nun das Bild, das an der Wand entsteht, wenn man ein Dia oder ein Video projiziert. Wenn man jetzt alles Licht ausschaltet — auch das des Projektors —, so verschwindet das Bild von der Wand. Niemand käme auf die Idee zu sagen, das Bild sei an der Wand geblieben.

Trotz dieses Unterschiedes hat das flüchtige Projektionsbild etwas Wesentliches gemeinsam mit dem gegenständlichen Bild, etwa mit einem fotografierten Papierbild — vorausgesetzt allerdings, das Papierbild wird beleuchtet. Und es hat auch etwas Wesentliches gemeinsam mit dem ebenso flüchtigen Bild auf dem Bildschirm des Fernsehers.

Wir wollen drei Bildsorten miteinander vergleichen: das Papierbild, das projizierte Bild und das Fernsehbild.

Damit das Problem übersichtlicher wird, nehmen wir an, der abgebildete „Gegenstand" bestehe nur aus einigen leuchtenden Punkten in einer dunklen Umgebung. Die leuchtenden Punkte sollen sich in einer einzigen Ebene befinden. Diese Ebene ist in Abb. 22.1 von der Seite dargestellt.

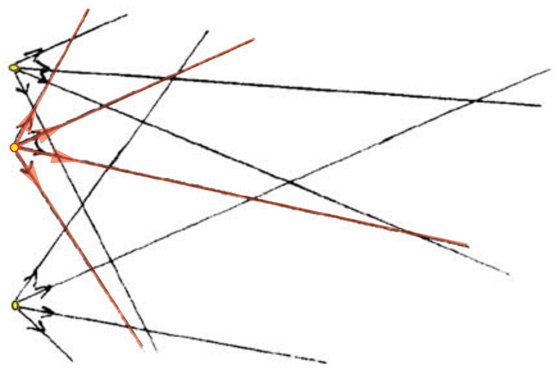


Abb. 22.1 Lichtverteilung vor einem Gegenstand, der nur aus drei leuchtenden Punkten besteht

Als Erstes betrachten wir das Licht, das von diesem „Gegenstand" selbst ausgeht: Von jedem der Punkte gehen Lichtstrahlen in die verschiedensten Richtungen weg. Von den anderen Stellen kommt kein Licht.

Wir betrachten nun ein Papierbild, das diese leuchtenden Punkte zeigt, Abb. 22.2. Das Bild wird von vorn her beleuchtet. Das einfallende Licht wird an allen Stellen des Papiers absorbiert, außer an den Stellen, wo sich die Bilder der hellen Punkte befinden: Von dort wird es zurückgeworfen und dabei gestreut. Die Verteilung des vom Papierbild weglaufenden Lichts ist dieselbe wie die des Lichts, das von den echten leuchtenden Punkten in Abb. 22.1 wegläuft.

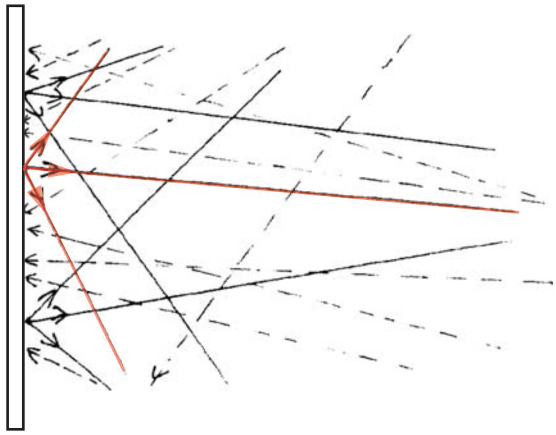


Abb. 22.2 Lichtverteilung vor einem Papierbild des „Gegenstandes" von Abb. 22.1. Das einfallende Licht ist gestrichelt dargestellt.

Du siehst, dass es wichtig ist, dass das Licht, das zurückgeworfen wird, gleichzeitig gestreut wird. Würde es reflektiert, so sähe man die hellen Punkte auf dem Bild nur aus einer einzigen Richtung.

Nun zum Projektionsbild, Abb. 22.3. Der Schirm selbst absorbiert nirgends. Er wirft alles Licht, das auf ihn trifft, zurück und streut es dabei. Es trifft aber nur an wenigen Stellen Licht auf den Schirm. Also wird auch nur von dort aus Licht zurückgeworfen. Die Verteilung des vom Schirm weglaufenden Lichts ist wieder dieselbe wie die des Originalgegenstandes in Abb. 22.1.

Man kann den Unterschied zwischen Papier- und Projektionsbild auch so beschreiben: Beim

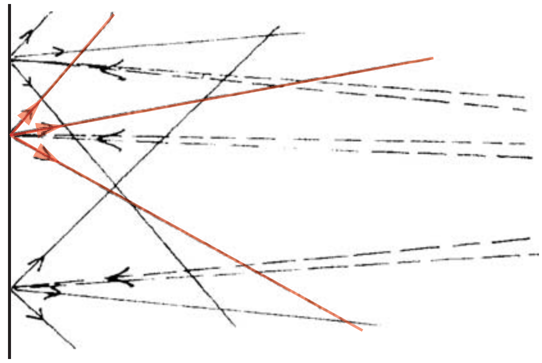


Abb. 22.3 Lichtverteilung vor einem Projektionsbild des „Gegenstandes" von Abb. 22.1. Das einfallende Licht ist gestrichelt dargestellt.

Papierbild sind die Daten im Papier gespeichert. Sie bleiben dort, auch wenn sich das Bild im Dunkeln befindet. Bei der Projektion ist der Datenspeicher der Computer, von dem das Bild kommt. Während der Projektion werden diese Daten herausgelesen. (Bei einem unbewegten Bild werden immer und immer wieder dieselben Daten herausgelesen.)

Wir betrachten schließlich noch das Fernsehbild. Im Gegensatz zum Papierbild und zum Projektionsbild wird der Bildschirm nicht beleuchtet. Er leuchtet selbst. Wieder nehmen wir an, dass das Bild des „Gegenstandes" von Abb. 22.1 dargestellt ist. Diesmal gehen einfach von einigen Stellen des Bildschirms Lichtstrahlen in alle Richtungen weg, Abb. 22.4. Wieder ist also die Lichtverteilung dieselbe wie die des Originalbildes, Abb. 22.1.

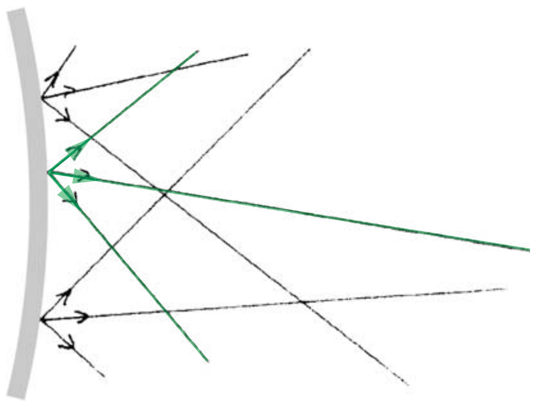


Abb. 22.4 Lichtverteilung vor einem Fernsehbild des „Gegenstandes" von Abb. 22.1

Bilder haben die Eigenschaft, dass sie flach sind oder „zweidimensional“. Sie haben keine Tiefe.

Unser primitiver Gegenstand, die nebeneinander liegenden Punkte, stellen auch ein zweidimensionales Gebilde dar, es hat auch keine Tiefe. Wie sieht nun die Lichtverteilung bei einem Gegenstand aus, der in der dritten Dimension ausgedehnt ist, der eine Tiefe hat? Das ist dir sicher bekannt, denn du weißt, wie man ein dreidimensionales Haus auf ein zweidimensionales Blatt Papier zeichnet. Man schiebt es in der dritten Dimension sozusagen zusammen. Man drückt es in Gedanken platt.

Wieder betrachten wir ein vereinfachtes Modell. Abb. 22.5 zeigt die Lichtverteilung des Originals, von der Seite gesehen. Die leuchtenden Punkte liegen hier nicht mehr in einer einzigen Ebene. Die Punkte A, B und C liegen in der Ebene 1, Punkt D liegt in der Ebene 2.

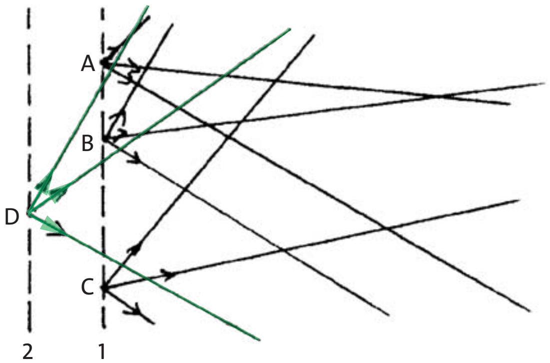


Abb. 22.5 Die Gegenstandspunkte liegen nicht mehr in einer einzigen Ebene.

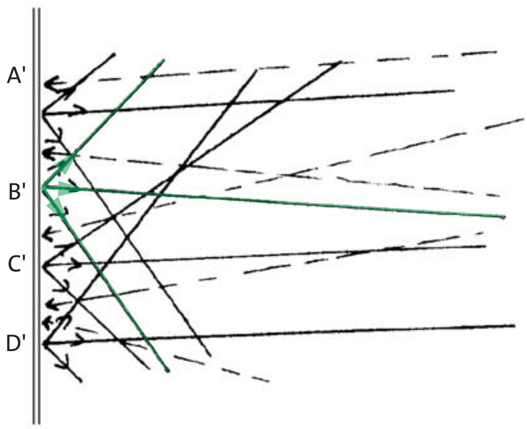


Abb. 22.6 Bild des „Gegenstandes“ von Abb. 22.5. Die leuchtenden Punkte sind in eine einzige Ebene zusammengeschoben worden.

Wir untersuchen wieder ein Bild dieser Punkte, zum Beispiel ein Foto, Abb. 22.6. Die Punkte sind beim Fotografieren in eine einzige Ebene zusammengeschoben worden. Man sieht, dass die Verteilung des Lichts, das vom Bild kommt, nicht mehr dieselbe ist wie die des Lichts, das vom Original kommt. Sie ist bei der dreidimensionalen Wirklichkeit anders als beim zweidimensionalen Bild.

Obwohl die Lichtverteilung beim Bild anders ist als beim echten Gegenstand, erkennen wir den Gegenstand auf dem Bild noch sehr gut. Andererseits sehen wir aber dem Bild deutlich an, dass es ein Bild ist. Wir werden es mit dem echten Gegenstand sicher nicht verwechseln.

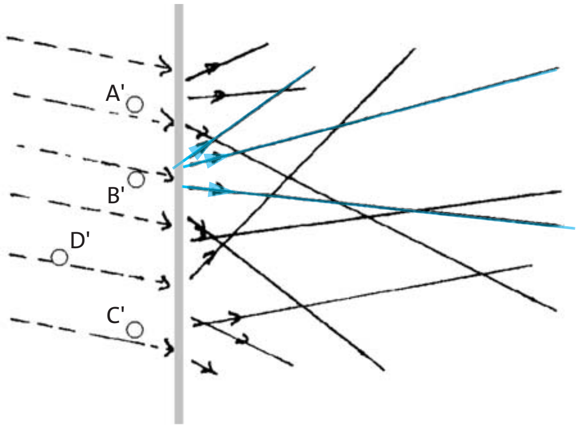


Abb. 22.7 Bei einem Hologramm ist die Lichtverteilung dieselbe wie beim Originalgegenstand.

Es gibt Bilder, die die Lichtverteilung auch eines dreidimensionalen Gegenstandes ganz korrekt wiederherstellen, Abb. 22.7. Man nennt sie Hologramme. Damit sie die richtige Lichtverteilung liefern, muss man sie allerdings mit Licht einer einzigen Richtung beleuchten. Am besten eignet sich hierzu das Licht eines Lasers.

Aufgaben

1. Vielleicht ist dir aufgefallen, dass es schwer ist, das Bild auf einem Dia zu erkennen, wenn man das Dia einfach in die Hand nimmt und betrachtet. Woran liegt das? Wie muss man das Dia halten, damit man das Bild gut sieht?
2. Wäre es nicht besser, ein Video mit dem Beamer auf einen Spiegel zu projizieren, statt auf eine Leinwand? Was würde man sehen?

22.2 Die Lochkamera

Sie ist das einfachste Gerät, mit dem man eine optische Abbildung machen kann: Ein Kasten mit einem kleinen Loch in der Mitte der einen Seite. Die dem Loch gegenüberliegende Seite ist eine Mattscheibe oder Pergamentpapier, d. h. ein Material, das Licht durchlässt und dabei streut. Auf der Mattscheibe erkennt man ein Bild der Gegenstände, die sich außerhalb des Kastens, auf der Seite des Loches befinden. Wie kommt das Bild zustande?

Der Übersichtlichkeit halber stellen wir uns wieder vor, die „Landschaft", die wir abbilden wollen, bestehe nur aus drei leuchtenden Punkten, die in einer Ebene liegen. Abb. 22.8a zeigt diese Ebene von der Seite gesehen und Licht, das von den Punkten ausgeht.

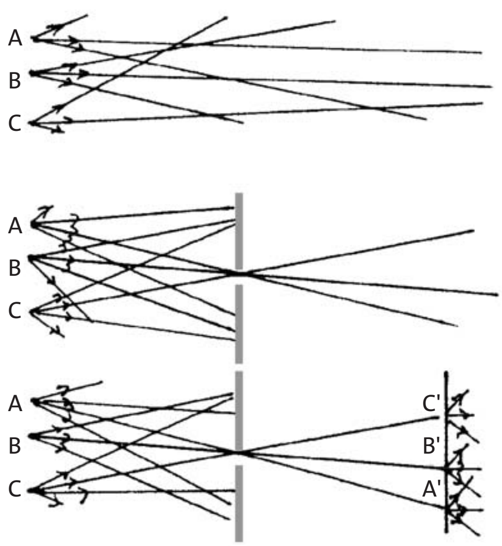


Abb. 22.8 Dem Licht, das vom Gegenstand kommt, wird zuerst eine Lochblende und dann eine Mattscheibe in den Weg gestellt.

Wir stellen diesem Licht als Erstes eine Lochblende in den Weg, Abb. 22.8b. Von dem nach rechts laufenden Licht lässt die Blende nur drei dünne Lichtbündel durch.

Diesen Lichtbündeln stellen wir nun noch eine Mattscheibe in den Weg, Abb. 22.8c. Die Mattscheibe wird von dem Licht, das durch die Lochblende gekommen ist, an drei Stellen getroffen. Dieses Licht wird von der Mattscheibe gestreut. Wir haben jetzt auf der Mattscheibe drei leuchtende Punkte A', B' und C'. A' ist das Bild von A, B' ist das Bild von B und C' ist das Bild von C. Die Lichtverteilung ist dieselbe wie die der drei leuchtenden Punkte A, B und C, nur liegen die Bildpunkte in umgekehrter Reihenfolge. Wir können auch sagen, das Bild stehe auf dem Kopf.

In unserem Beispiel lagen die leuchtenden Gegenstandspunkte in einer einzigen Ebene, und die Mattscheibe der Lochkamera lag parallel zu dieser Ebene. Der Gegenstand war flach, genauso flach wie die Mattscheibe. Wir nehmen nun an, der Gegenstand habe „Tiefe": Einer der Gegenstandspunkte liege weiter hinten, Abb. 22.9. Da die Mattscheibe flach ist, bekommen wir natürlich wieder ein flaches Bild. Unsere „Landschaft" wurde wieder „plattgedrückt".

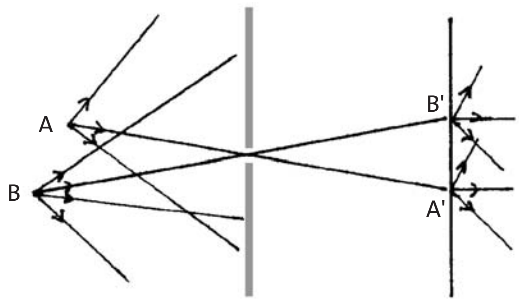


Abb. 22.9 Die Gegenstandspunkte liegen nicht mehr in einer Ebene.

Eine besonders eindrucksvolle Variante der Lochkamera ist die Camera obscura: Man verdunkelt das Zimmer, lässt aber in der Fensterverdunklung ein kleines Loch. Man sieht nun auf der dem Loch gegenüberliegenden weißen Wand ein

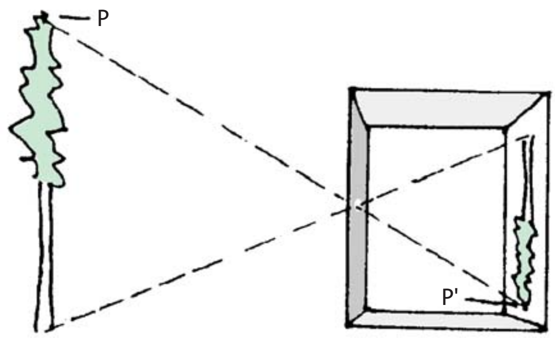


Abb. 22.10 Camera obscura. Das Bild wird vom Innern der „Lochkamera" her betrachtet.

Bild der Landschaft außerhalb des Zimmers, Abb. 22.10.

Wieder sorgt das Loch dafür, dass auf jede Stelle der Wand nur Licht aus einer bestimmten Richtung fällt. So trifft das Licht der Baumspitze P nur an die Stelle P' der Wand. Die weiße Wand selbst ist nötig, um das Licht zu streuen.

Aufgaben

1. Warum sieht man kein Bild, wenn man bei einer Lochkamera statt der Mattscheibe eine gewöhnliche Glasscheibe benutzt?
2. Was sieht man an der Rückwand einer Camera obscura, wenn diese Wand ein Spiegel ist? Der abgebildete Gegenstand sei ein einziger leuchtender Punkt. Wie ist die Lichtverteilung?

22.3 Der Zusammenhang zwischen Gegenstandsgröße und Bildgröße

Abb. 22.11 zeigt schematisch die Abbildung eines Gegenstandes mit einer Lochkamera.

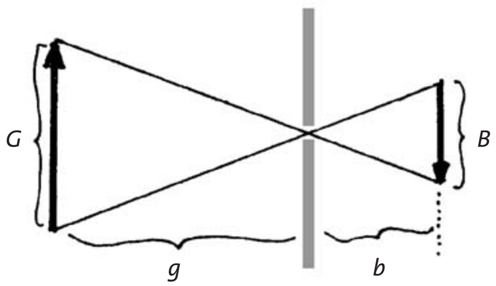


Abb. 22.11 *G* ist die Gegenstandsgröße, *B* die Bildgröße, *g* die Gegenstandsweite und *b* die Bildweite.

Wir nennen G die Gegenstandsgröße und B die Bildgröße. Der Abstand g des Gegenstandes von der Lochblende heißt Gegenstandsweite, der Abstand b des Bildes von der Blende Bildweite. Für den Zusammenhang zwischen den vier Größen G, B, g und b gilt eine einfache Beziehung:

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$$

Falls du aus dem Mathematikunterricht die Strahlensätze kennst, kannst du diese Gleichung aus Abb. 22.11 direkt ablesen. Kennst du die Strahlensätze nicht, so kannst du dich durch Ausprobieren von der Gültigkeit der Gleichung überzeugen.

In Abb. 22.11 zum Beispiel ist

$$G = 30 \text{ mm}$$
$$B = 15 \text{ mm}.$$

Daraus folgt $G/B = 2$.

Außerdem liest man ab

$$g = 40 \text{ mm}$$
$$b = 20 \text{ mm}.$$

Daraus ergibt sich $g/b = 2$. Die Gleichung $G/B = g/b$ ist also erfüllt.

Aufgaben

1. Ein Kirchturm wird mit einer Lochkamera abgebildet. Der Kirchturm befindet sich in 100 m Abstand von der Kamera. Der Abstand zwischen Lochblende und Schirm beträgt 16 cm. Das Bild des Kirchturms ist 8 cm hoch. Wie hoch ist der Kirchturm?
2. Der Kölner Dom ist 157 m hoch. Mit einer 20 cm langen Lochkamera erzeugst du ein Bild, auf dem die Türme 2 cm hoch sind. Wie weit ist der Dom entfernt?
3. Ein acht Meter hoher Baum liefert in einer Camera obscura ein ein Meter hohes Bild. Wie hoch ist ein zweiter Baum, der dicht neben dem ersten steht, und dessen Bild einen halben Meter groß ist?

22.4 Verbesserung der Lochkamera

Wir bauen eine Camera obscura. Auf der Wand ist das Bild des gegenüberliegenden Hauses zu sehen. Aber das Bild ist sehr dunkel. „Das lässt sich leicht ändern“, denkst du vielleicht, „wir machen das Loch einfach größer.“ Wir probieren es aus. Tatsächlich — das Bild wird heller. Allerdings passiert gleichzeitig etwas Unerwünschtes: Das Bild wird unscharf. Warum es das wird, erkennst du anhand von Abb. 22.12.

Im oberen Teilbild ist das Loch klein. Das Bild der beiden Gegenstandspunkte A und B sind zwei

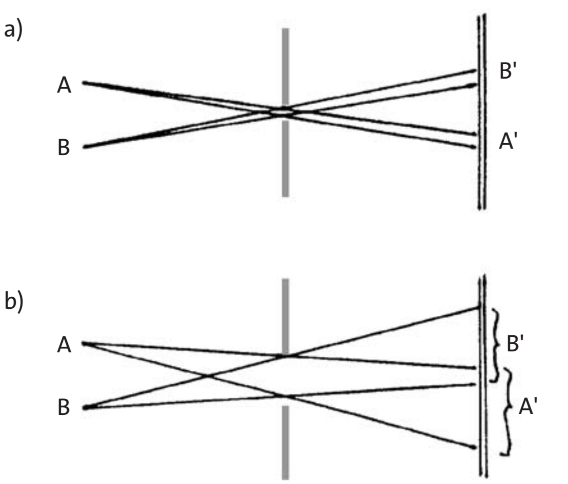


Abb. 22.12 (a) Kleines Loch: Die Bilder sind voneinander getrennt. (b) Großes Loch: Die Bilder überlappen sich.

kleine leuchtende Flecke A' und B'. Im unteren Teilbild ist das Loch groß. Die „Bilder“ von A und B sind jetzt zwei Flecke, die so groß sind, dass sie sich etwas überlappen. Man kann A' und B' nicht mehr deutlich voneinander trennen. Das Bild der Punkte A und B ist unscharf.

Wir können allgemein schließen:

> Je größer das Loch der Lochkamera ist, desto heller ist das Bild, desto unschärfer ist es aber auch.

Nur durch Vergrößern des Loches können wir also unser Problem nicht lösen. Wir brauchen eine bessere Idee.

Wir beginnen zunächst wieder mit einem kleinen Loch, und erhalten ein scharfes, aber dunkles Bild. Wir machen nun in einiger Entfernung von dem kleinen Loch ein zweites kleines Loch. Was sieht man auf der Wand? Ein zweites Bild, Abb. 22.13a. Oder besser: dasselbe Bild zweimal. Die beiden Bilder sind gegeneinander versetzt.

Wir sind der Lösung unseres Problems schon näher. Wir brauchen die beiden Bilder nur noch zu verschieben, sodass sie zur Deckung kommen. Wir müssen die Lichtstrahlen, die die beiden Bilder erzeugen, zur Mitte hin knicken. Wie man das anstellen kann, weißt du: mit Prismen, Abb. 22.13b. Das Ergebnis ist ein Bild, das doppelt so hell ist wie das Bild eines einzigen Loches. Und das Bild ist scharf!

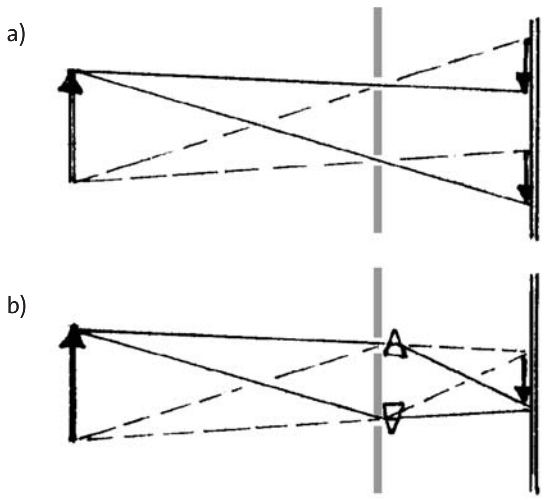


Abb. 22.13 (a) Die Lochkamera mit zwei Löchern erzeugt zwei Bilder. (b) Die beiden Bilder werden mithilfe von Prismen zur Deckung gebracht.

Mit diesem Vorteil haben wir uns aber auch einen Nachteil eingehandelt. Bei unserer ersten Lochkamera – der mit dem einen Loch – haben wir immer ein scharfes Bild, egal in welchem Abstand von der Blende der Schirm steht. Dieser Abstand wirkte sich nur auf die Bildgröße aus, Abb. 22.14a.

Das ist bei der Doppel-Lochkamera anders. Die beiden Bilder in Abb. 22.13b fallen nur dann zusammen, wenn sich der Schirm in einem bestimmten Abstand von der Blende befindet. In Abb. 22.14b sind drei verschiedene Schirmpositionen eingezeichnet. Nur wenn der Schirm in Position 2 steht, fallen die beiden Bilder zusammen. Steht er weiter vorn, in Position 1, oder weiter hinten, in Position 3, so fallen die beiden Bilder nicht zusammen.

In Abb. 22.14c wurde in der Mitte zwischen den beiden Löchern noch ein drittes Loch gemacht. Vor dieses brauchen wir kein Prisma zu stellen. Das entsprechende Bild fällt von selbst mit den beiden anderen Bildern zusammen. Wir erkennen an den Lichtstrahlen, die durch das mittlere Loch laufen, dass nach wie vor die Gleichung

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$$

gelten muss.

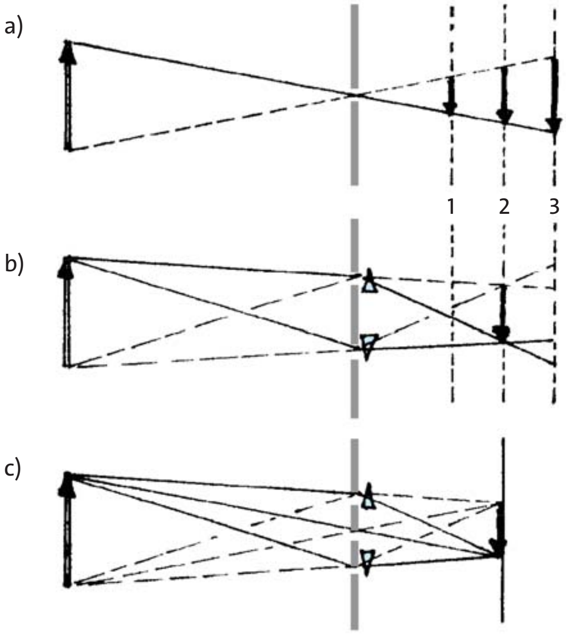


Abb. 22.14 (a) Bei der Ein-Loch-Kamera wirkt sich der Abstand des Schirms nur auf die Bildgröße aus. (b) Bei der Zwei-Loch-Kamera muss der Schirm in einer bestimmten Entfernung von der Blende stehen, damit ein scharfes Bild entsteht. (c) Vor dem Loch in der Mitte braucht kein Prisma zu stehen.

Aufgabe

1. Statt mit Prismen kann man Licht auch mit Spiegeln ablenken. Wie könnte eine „Zwei-Loch-Kamera" aussehen, die statt Prismen Spiegel verwendet? Wie würde das Gegenstück zu einer Lochkamera mit vielen Prismen aussehen? Was für ein Spiegel entsteht, wenn man alle Einzelspiegel zu einem zusammenhängenden Spiegel zusammensetzt?

22.5 Die Linse

Wir wollen das Bild noch heller haben. Es ist klar, wie das zu erreichen ist. Wir machen noch mehr Löcher in unsere Blende und setzen vor jedes Loch ein geeignetes Prisma.

Schließlich können wir aber auch ein ganz großes Loch machen, wie wir es schon einmal versucht hatten. Wir müssen nur die ganze Fläche des Lochs mit Prismen bedecken, Abb. 22.15.

Das Licht, das in die Mitte des großen Lochs fällt, braucht gar nicht abgelenkt zu werden. Je

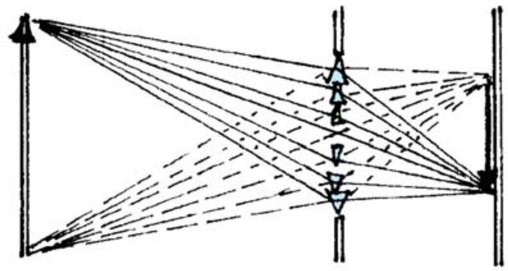


Abb. 22.15 Die ganze Fläche der großen Öffnung ist mit Prismen überdeckt.

weiter außen aber das Licht ankommt, desto stärker muss es zur Mitte hin geknickt werden. Die Prismen werden also von außen zur Mitte hin immer flacher. Abb. 22.16a zeigt, wie die Prismen von der Seite aussehen. Das Loch erstreckt sich aber nicht nur in senkrechter Richtung, sondern auch nach der Seite. Die Prismen werden also, wenn man vom Lochrand zur Mitte geht, immer flacher.

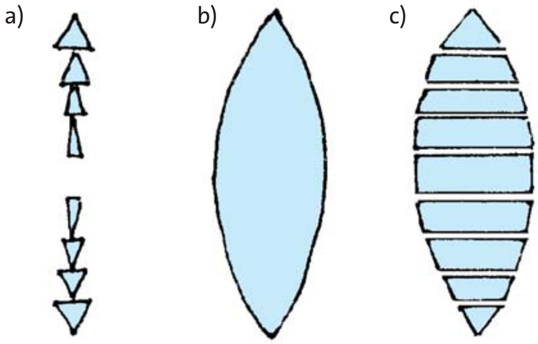


Abb. 22.16 Statt vieler Einzelprismen (a) kann man einen zusammenhängenden Glaskörper (b) verwenden. Diesen kann man sich aus vielen Prismen zusammengesetzt denken (c).

Statt vieler Einzelprismen kann man auch einfach einen zusammenhängenden Glaskörper verwenden, eine Linse, Abb. 22.16b. Man kann sich die Linse vorstellen als aus vielen einzelnen kleinen Prismen zusammengesetzt, Abb. 22.16c. Die Prismen von Abb. 22.16c sind zwar dicker als die von Abb. 22.16a. Aber da es für die Ablenkung nur auf den Winkel zwischen den gegenüberliegenden Prismenflächen ankommt, funktioniert die optische Abbildung auch mit den dicken Prismen.

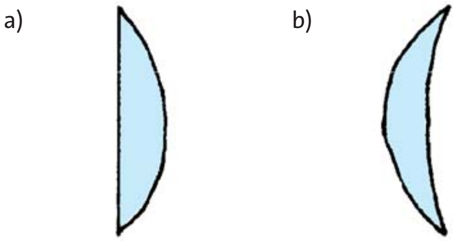


Abb. 22.17 Verschiedene Linsenformen

Eine Linse kann auch eine andere Form als die in Abb. 22.16b und trotzdem denselben Effekt haben, Abb. 22.17. Wichtig ist nur, dass der Winkel zwischen den gegenüberliegenden Oberflächenteilen von der Mitte nach außen hin zunimmt.

Die Oberflächen der meisten Linsen sind Kugelflächen. Manchmal ist eine der beiden Oberflächen auch eine Ebene, Abb. 22.17a.

Abb. 22.18 zeigt, wie die Strahlen verlaufen, wenn ein Gegenstand durch eine Linse abgebildet wird.

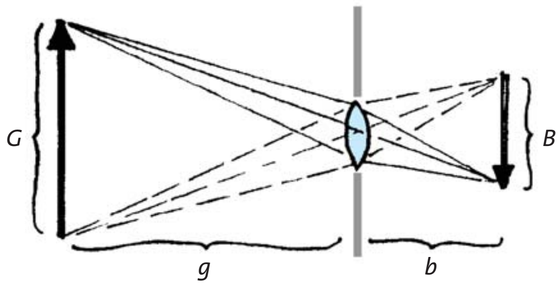


Abb. 22.18 Ein Gegenstand wird durch eine Linse abgebildet.

Da die optische Abbildung mit einer Linse im Prinzip nichts anderes ist, als die mit unserer verbesserten Lochkamera, die wir im vorigen Abschnitt untersucht haben, gilt auch für sie:

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$$

22.6 Die optische Abbildung mit Linsen

Wir hatten bei unserer verbesserten Lochkamera gesehen, dass das Bild nur dann scharf ist, wenn der Schirm in der richtigen Entfernung von der Lochblende steht. Das Entsprechende muss auch gelten, wenn wir eine Linse zur Abbildung verwenden: Das Bild ist nur dann scharf, wenn der Schirm in der richtigen Entfernung steht. Wir probieren es aus, Abb. 22.19.

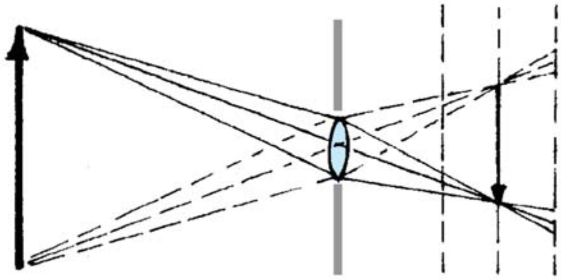


Abb. 22.19 Das Bild ist nur dann scharf, wenn der Schirm an einer bestimmten Stelle steht (bei fester Gegenstandsweite).

Die Gerade, die senkrecht durch die Mitte der Linse geht, nennt man optische Achse. Wir stellen den Schirm senkrecht zur optischen Achse auf und schieben ihn parallel zur optischen Achse hin und her. Wir stellen fest: Das Bild ist nur scharf, wenn sich der Schirm in einer bestimmten Entfernung b von der Linse befindet. In anderen Worten: wenn die Bildweite b einen bestimmten Wert hat.

Man sagt auch, in der Entfernung b von der Linse befinde sich das Bild.

Wir lassen nun den Schirm an der Stelle stehen, an der wir das (scharfe) Bild erhalten hatten und schieben den Gegenstand hin und her, wieder parallel zur optischen Achse, Abb. 22.20. Das heißt, wir verändern die Gegenstandsweite g. Das Bild wird unscharf, wenn wir den Gegenstand zur Linse hinschieben, Abb. 22.20b, und es wird unscharf, wenn wir den Gegenstand von der Linse wegschieben, Abb. 22.20c. Das Bild ist also (bei festgehaltenem Schirm) nur dann scharf, wenn sich der Gegenstand in einer bestimmten Entfernung von der Linse befindet.

Ein dritter Versuch: Wir gehen wieder von derjenigen Stellung von Schirm und Gegenstand aus, bei der auf dem Schirm ein scharfes Bild entsteht. Wir verschieben den Gegenstand ein Stück in Richtung Linse. Das Bild wird unscharf. Wir können es nun aber nicht nur dadurch wieder scharf-

a)
b)
c)

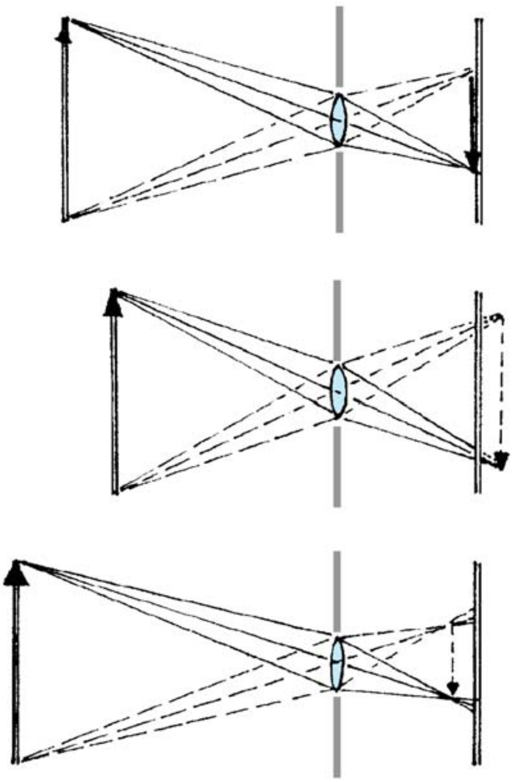


Abb. 22.20 (a) Ausgangslage (b) Die Gegenstandsweite wurde vermindert. (c) Die Gegenstandsweite wurde vergrößert.

machen, dass wir den Gegenstand an seine alte Stelle zurückbringen, sondern auch durch Verschieben des Schirms — und zwar von der Linse weg.

Wir verschieben nun den Gegenstand noch einmal — diesmal aber von der Linse weg. Und machen das Bild durch Verschieben des Schirms in Richtung Linse wieder scharf.

Unsere Beobachtungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

> Zu einer bestimmten Gegenstandsweite g gehört eine bestimmte Bildweite b. Je größer g, desto kleiner b.

Gegenstands- und Bildweite werden auf der optischen Achse gemessen.

Bei der gewöhnlichen Lochkamera (der mit einem einzigen Loch) gab es einen solchen Zusammenhang nicht. Man konnte Gegenstandsweite und Bildweite unabhängig voneinander wählen.

Wir wollen den Zusammenhang zwischen g und b genauer untersuchen.

Wir stellen den Gegenstand in sehr großer Entfernung von der Linse auf und suchen die entsprechende Bildweite. Wir schieben dann den Gegenstand noch weiter von der Linse weg. Das Bild wird kleiner, bleibt aber scharf. Die Bildweite wird also nicht mehr geringer, Abb. 22.21. Sie hat den kleinsten Wert erreicht, den sie überhaupt haben kann. Diesen Wert der Bildweite nennt man Brennweite f der Linse. Die Ebene, in der das Bild entsteht, ist die Brennebene.

> Für Gegenstände, die sehr weit von der Linse entfernt sind, gilt: Bildweite b = Brennweite f.

Was passiert, wenn wir den Gegenstand in die andere Richtung verschieben, d. h. zur Linse hin? Das Bild wandert von der Linse weg. Wir dürfen aber den Gegenstand nicht zu nahe an die Linse heranrücken. Wenn sich nämlich die Gegenstandsweite der Brennweite nähert, wandert das

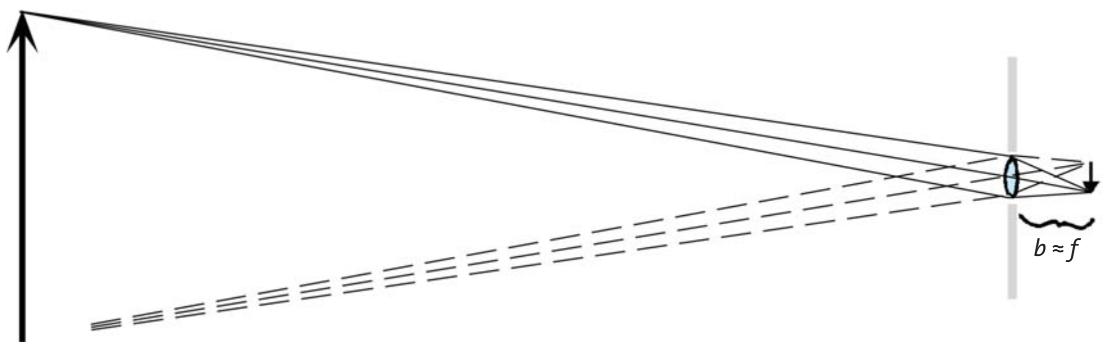


Abb. 22.21 Die Bildweite wird von der Gegenstandsweite unabhängig, wenn g sehr groß wird. Sie wird gleich der Brennweite.

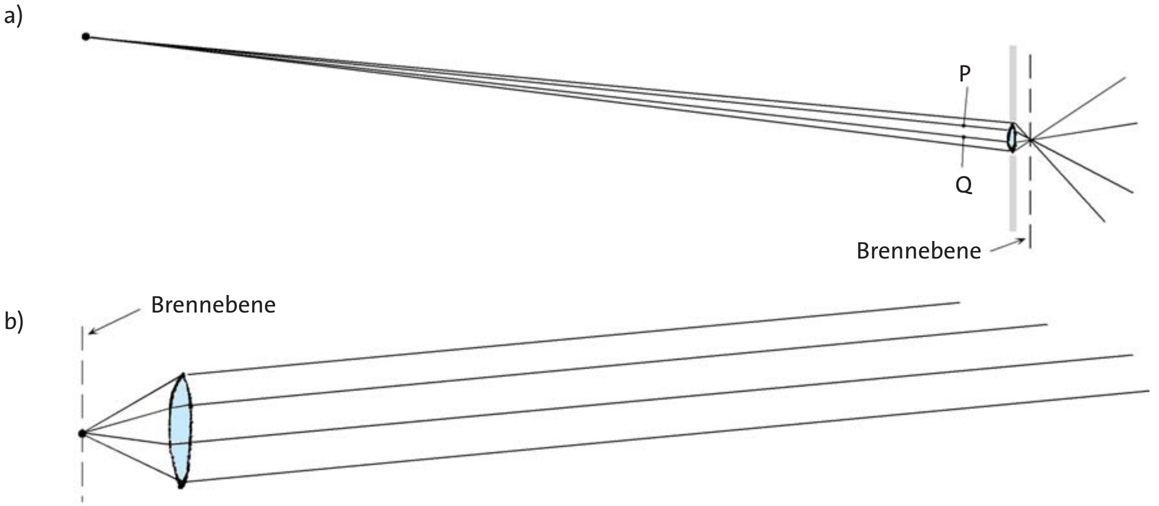


Abb. 22.22 (a) Der Gegenstand ist ein einziger leuchtender Punkt in sehr großer Entfernung von der Linse. Das Licht hinter der Linse läuft durch einen Punkt in der rechten Brennebene.(b) Der Gegenstand ist ein einziger leuchtender Punkt in der linken Brennebene. Das Licht auf der rechten Seite der Linse ist parallel.

Bild sehr schnell und immer schneller, immer weiter weg. Wird g kleiner als f, so gibt es kein scharfes Bild mehr.

Man sagt auch:

> Für $g = f$ befindet sich das Bild in „unendlich großer Entfernung".

Oder in Symbolen:

> Für $g = f$ ist $b = \infty$.

Abb. 22.22 zeigt noch zwei Spezialfälle.

a) Der Gegenstand ist ein einziger leuchtender Punkt, der sich in sehr großer Entfernung von der Linse befindet. Das Licht, das auf die Linse trifft, hat vor der Linse an jeder Stelle nur eine einzige Richtung. Und die Lichtrichtungen an verschiedenen Stellen, z. B. in den Punkten P und Q, sind auch gleich. Es ist also paralleles Licht. Das Bild unseres Gegenstandes ist ein Punkt in der rechten Brennebene. In anderen Worten:

> Paralleles Licht, das auf eine Linse trifft, läuft hinter der Linse durch einen Punkt in der Brennebene.

b) Der Gegenstand ist ein leuchtender Punkt, der in der linken Brennebene liegt. Das Bild ist ein Punkt in „unendlich großer Entfernung". Das Licht rechts von der Linse muss daher parallel sein.

> Das Licht, das von einer punktförmigen Quelle in der Brennebene vor der Linse kommt, ist hinter der Linse parallel.

Man kann also, wie mit einem Parabolspiegel, paralleles Licht in einen Punkt konzentrieren und Licht einer Punktquelle parallel machen.

Aufgabe

1. Du hast eine Linse unbekannter Brennweite vor dir, außerdem eine Kerze und Streichhölzer. Wie kannst du die Brennweite der Linse bestimmen? Beschreibe zwei Verfahren.

22.7 Brennweite und Brechkraft

Die Brennweite ist eine für die Linse charakteristische Größe. Es gibt Linsen der verschiedensten Brennweiten. Wie kann man die Brennweite einer Linse feststellen? Man macht eine optische Abbildung, bei der der Gegenstand sehr weit von der Linse entfernt ist, so wie in Abb. 22.21. Man misst die Entfernung des Bildes von der Linse und hat damit, weil jetzt $f = b$ ist, gleichzeitig die

Brennweite. Wir bestimmen auf diese Art die Brennweite verschiedener Linsen und stellen fest:

> Je stärker die Oberflächen einer Linse nach außen gekrümmt sind, desto kleiner ist die Brennweite.

Die Brennweite wird durch die Krümmung beider Oberflächen beeinflusst. So haben die drei Linsen von Abb. 22.23 dieselbe Brennweite. Wie man sieht, darf sogar die eine Oberfläche nach innen gekrümmt sein, wenn dafür die andere umso mehr nach außen gekrümmt ist.

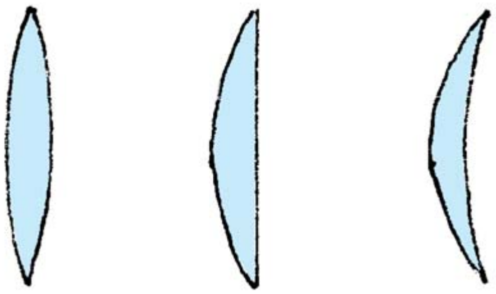


Abb. 22.23 Alle drei Linsen haben dieselbe Brennweite.

Statt durch die Brennweite beschreibt man eine Linse oft durch den Kehrwert der Brennweite, die Brechkraft D:

$$D = \frac{1}{f}$$

Je größer die Brechkraft einer Linse ist, desto stärker werden die Lichtstrahlen am Linsenrand zur Mitte geknickt.

Die Maßeinheit der Brechkraft ist 1/m. Diese Einheit nennt man auch Dioptrie, abgekürzt dpt. Es ist also:

$$1 \text{ dpt} = 1/\text{m}$$

Eine planparallele Platte, die dem Licht (fast) nichts tut, hat die Brechkraft 0 dpt.

22.8 Das Zusammensetzen von Linsen

Wir stellen eine Linse L_1 der Brennweite f_1 und einen Schirm so auf, dass ein weit entfernter Gegenstand (links im Bild) auf den Schirm abgebildet wird, Abb. 22.24a. Weil der Gegenstand so weit weg ist, ist die Bildweite gleich der Brennweite der Linse.

Wir ersetzen die Linse durch eine andere Linse L_2 der Brennweite f_2. Das neue Bild befindet sich im Abstand f_2 von der Linse, Abb. 22.24b.

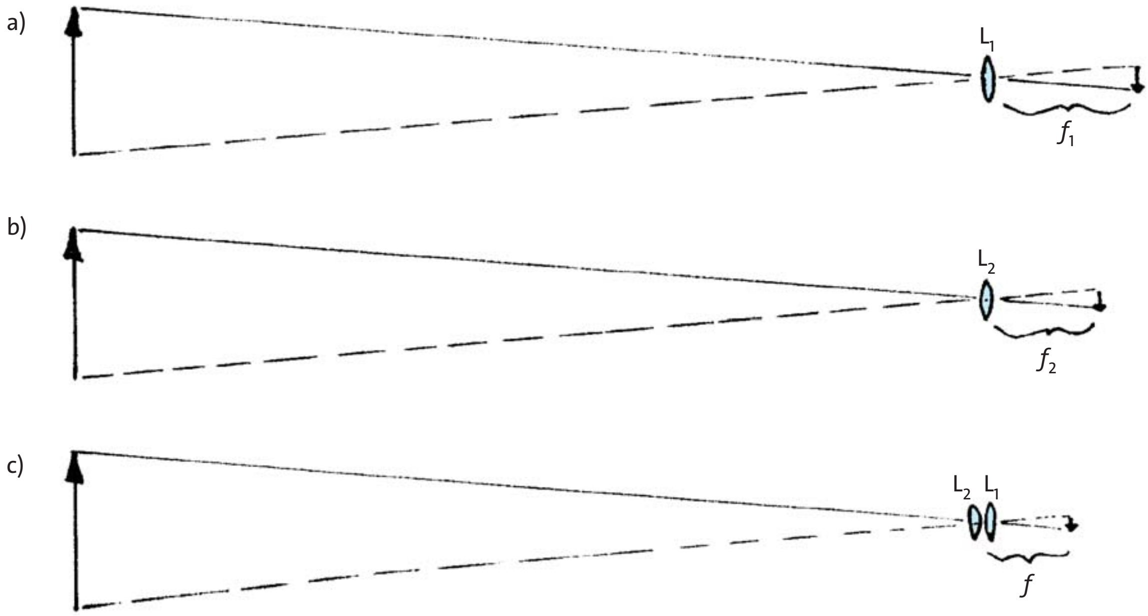


Abb. 22.24 Die Brennweite des Linsensystems (c) ist kleiner als die von Linse L_1 (a) und kleiner als die von Linse L_2 (b).

Wir stellen nun beide Linsen gleichzeitig auf, und zwar die eine so nah wie es geht bei der anderen. Und wieder suchen wir die Stelle, an der das (scharfe) Bild entsteht. Wir stellen fest, dass die Bildweite kleiner ist als f_1 und kleiner als f_2, Abb. 22.24c. (Wir messen die Bildweite von der Mitte des Linsenpaares aus.)

Die neue Bildweite ist die Brennweite f des aus L_1 und L_2 bestehenden Linsensystems. Es ist also

$$f < f_1 \text{ und } f < f_2.$$

Oder durch die Brechkraft ausgedrückt: Die Brechkraft D des Linsensystems ist größer als die Brechkraft D_1 von Linse L_1 und größer als die Brechkraft D_2 von Linse L_2. Misst man die drei Brennweiten f, f_1 und f_2 und rechnet um auf die Brechkräfte, so stellt man fest:

$$D = D_1 + D_2.$$

Die Brechkraft eines Linsensystems ist gleich der Summe der Brechkräfte der Einzellinsen.

Abb. 22.25 zeigt links eine Linse L_1, die eigentlich keine ist: Sie ist außen dicker als innen. Eine ihrer Oberflächen ist nach innen gewölbt, die andere ist eben. Wir setzen diese Linse vor eine andere „richtige“ Linse L_2. Die nach außen gewölbte Oberfläche der zweiten Linse passt gerade zu der nach innen gekrümmten der ersten.

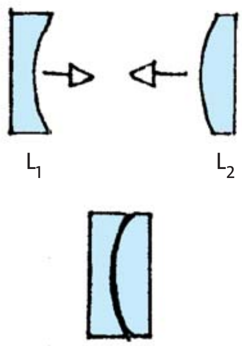


Abb. 22.25 Die linke Linse hat eine negative, die rechte eine positive Brechkraft.

Insgesamt entsteht eine planparallele Platte, d. h. ein Linsensystem mit der Brechkraft 0 dpt. Wir wollen nun, dass die Gleichung $D = D_1 + D_2$ auch hier gültig bleibt. Damit sich für die Summe der Brechkräfte 0 dpt ergibt, muss D_1 negativ sein. Wenn die rechte Linse vier Dioptrien hat, so muss die linke minus vier Dioptrien haben:

$$D_2 = 4 \text{ dpt und } D_1 = -4 \text{ dpt}.$$

Linsen, die außen dicker sind als innen, haben also eine negative Brechkraft.

Setzt man vor eine Linse mit

$$D_1 = 5 \text{ dpt}$$

eine andere mit

$$D_2 = -1{,}5 \text{ dpt},$$

so erhält man ein Linsensystem mit

$$D = 3{,}5 \text{ dpt}.$$

Aufgaben

1. Eine Linse mit einer Brechkraft von 3 dpt und eine mit einer Brechkraft von –4 dpt werden zu einem Linsensystem vereinigt. Welche Brechkraft hat das Linsensystem?
2. Zwei Linsen mit einer Brennweite von je 40 cm werden hintereinander aufgestellt. Welche Brechkraft hat das Linsensystem? Welche Brennweite hat es?
3. Drei Linsen werden hintereinander gesetzt. Die erste hat eine Brennweite von von 20 cm und die zweite hat eine Brennweite von 50 cm. Die dritte hat eine Brechkraft von minus zwei Dioptrien. Welche Brechkraft hat das Linsensystem?
4. Du hast eine Linse mit nach innen gewölbten Oberflächen vor dir und möchtest ihre Brechkraft bestimmen. Du weißt, dass du es nicht nach demselben Verfahren machen kannst, wie bei einer normalen Linse. Wie gehst du vor? Was für Geräte brauchst du dazu?

22.9 Die Schärfentiefe

Wir haben bisher nur die optische Abbildung flacher Gegenstände untersucht, d. h. von Gegenständen, die sich durch eine einzige Gegenstandsebene beschreiben lassen.

Problematisch wird es nun, wenn der Gegenstand in der Richtung der optischen Achse ausgedehnt ist, wenn er eine Tiefenausdehnung hat.

Wir betrachten als einfachstes Beispiel die optische Abbildung von zwei leuchtenden Punkten A und B, die sich in unterschiedlicher Entfernung g_A bzw. g_B von der Linse befinden. Da g_A und g_B verschieden sind, sind auch die Bildweiten b_A und b_B nicht gleich.

Stellt man den Schirm so auf, dass seine Entfernung von der Linse b_A ist, Abb. 22.26a, so ist das Bild von A scharf. Das Licht, das von B kommt, erzeugt keinen scharfen Punkt, sondern einen größeren Fleck. Das Bild von B ist unscharf.

Stellt man den Schirm dagegen im Abstand b_B von der Linse auf, Abb. 22.26b, so ist das Bild von B scharf und das von A unscharf.

Also: Wenn das eine Bild scharf ist, ist das andere unscharf.

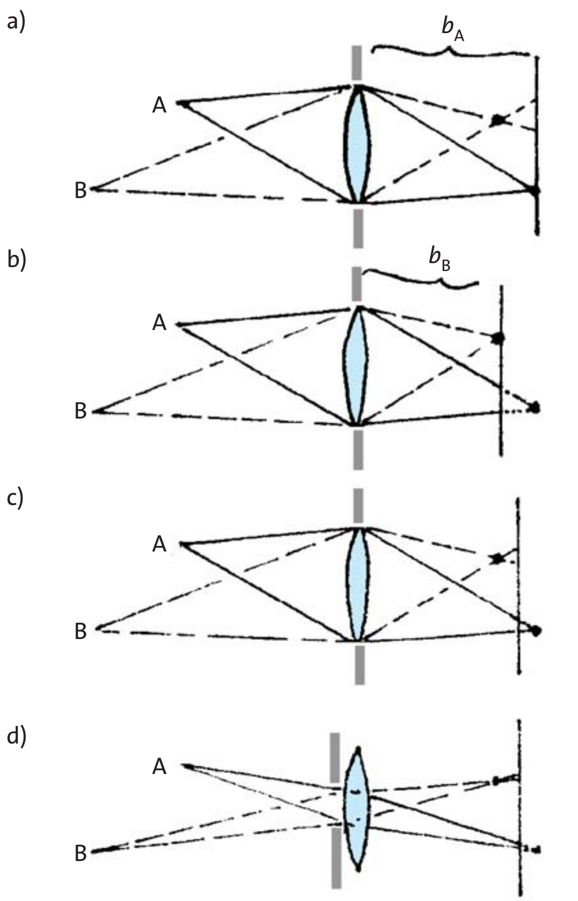


Abb. 22.26 (a) Das Bild von A ist scharf, das von B unscharf. (b) Das Bild von B ist scharf, das von A unscharf. (c) Ein Kompromiss: Beide Bilder sind noch etwas unscharf. (d) Der Linsendurchmesser wurde verkleinert. Beide Bilder sind scharf.

Wir machen nun einen Kompromiss und stellen den Schirm in die Mitte zwischen die beiden Abstände b_A und b_B, Abb. 22.26c. Jetzt sind beide Bilder unscharf, aber das Bild von A ist nicht so unscharf wie in Abb. 22.26b und das von B nicht so unscharf wie in Abb. 22.26a.

Schließlich noch ein Eingriff in unsere optische Abbildung: Wir setzen vor die Linse eine Lochblende, sodass nur durch den inneren Teil der Linse Licht hindurchlaufen kann, Abb. 22.26d. Das ist dasselbe, als hätten wir die Linse durch eine Linse kleineren Durchmessers (aber derselben Brennweite) ersetzt.

Was passiert? Das Bild wird nicht nur dunkler, es wird auch schärfer. Warum, erkennt man anhand von Abb. 22.26d: Die Flecke, die man als „Bilder" von A und B erhält, sind kleiner geworden. Macht man die Blende immer kleiner, so wird man sich schließlich mit der erreichten Schärfe zufrieden geben.

Es wird immer ein gewisser Tiefenbereich auf der Gegenstandsseite hinreichend scharf abgebildet. Je kleiner der Linsendurchmesser ist, desto größer ist dieser Bereich. Man nennt diesen Tiefenbereich die Schärfentiefe.

Wir haben damit:

> Je kleiner der Linsendurchmesser, desto größer die Schärfentiefe.

Eine kleine Linse bedeutet aber auch weniger Licht, ein dunkleres Bild. Also:

> Große Schärfentiefe und große Bildhelligkeit schließen sich gegenseitig aus.

22.10 Objektive

Du hast nun das Wesentliche über die Abbildung mit Linsen erfahren. Mit dem, was du gelernt hast, ist allerdings längst noch nicht alles gesagt. Vielleicht ist es dir schon aufgefallen, dass eine Digitalkamera, eine Videokamera oder ein Beamer zur Abbildung nicht einfach eine einzige Linse benutzt, sondern mehrere: ein Objektiv.

Nach unseren bisherigen Vorstellungen sollten aber 2, 3 oder noch mehr Linsen einer einzigen gleichwertig sein. Man sollte das Objektiv durch eine einzige Linse ersetzen können. Wir wissen ja sogar schon, wie man die Brechkraft dieser einen Ersatzlinse berechnet, wenn man die Brechkräfte der verschiedenen, das Objektiv bildenden Einzellinsen kennt.

Trotzdem ist es nicht dasselbe, wenn man statt eines Objektivs eine einzige Linse verwendet. Denn was wir über die optische Abbildung mit einer Linse gelernt haben, ist nur näherungsweise richtig. Bei genauerem Hinsehen stellt man fest, dass eine Linse einen leuchtenden Punkt nie genau, sondern nur näherungsweise in einen anderen leuchtenden Punkt abbildet. Außerdem ist das Bild einer Ebene, die senkrecht zur optischen Achse steht, nicht eben, sondern etwas gekrümmt. Eine Gerade in der Wirklichkeit ergibt als Bild eine etwas gekrümmte Linie. Ein weißer Punkt wird in eine Folge kleiner farbiger Ringe abgebildet. Und es gibt noch weitere solcher Abbildungsfehler.

Man kann nun diese Unvollkommenheiten der Abbildung dadurch vermindern, dass man statt einer einzigen Linse mehrere Linsen verwendet. Das Berechnen solcher Objektive ist allerdings ein kompliziertes Geschäft.

Abb. 22.27 zeigt ein Fotoapparat-Objektiv im Querschnitt. Mikroskop- Objektive haben oft mehr als 10 Linsen.

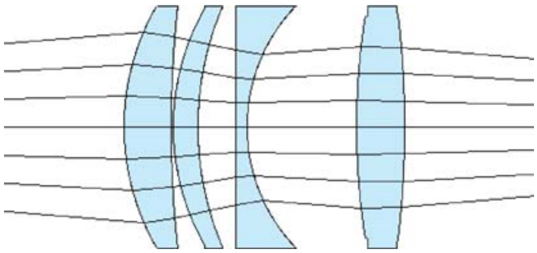


Abb. 22.27 Vierlinsiges Objektiv eines Fotoapparats

Man verwendet mehrere Linsen noch aus einem anderen Grund. Wenn man die Linsen des Objektivs in einem größeren Abstand voneinander aufstellt, kann man durch Verschieben einzelner Linsen die Brennweite des Objektivs verändern. Man nennt ein solches Objektiv ein Zoom-Objektiv oder kurz ein Zoom. Dieses Verhalten steht im Widerspruch zu unserer Regel: „Die Brechkraft eines Linsensystems ist gleich der Summe der Brechkräfte der Einzellinsen.“ Nach dieser Regel müsste die Brennweite des Objektivs allein durch die Brennweiten der Einzellinsen bestimmt sein, und nicht durch deren Abstand. Wir sehen jetzt, dass diese Regel nur näherungsweise gelten kann. Tatsächlich gilt sie nur wenn die Linsen des Objektivs dicht beieinander stehen.

22.11 Die Fotokamera

Im Wesentlichen kennen wir die Fotokamera schon. Abb. 22.28 zeigt ihren Aufbau schematisch. Das Objektiv bildet die Dinge, die sich vor der Kamera befinden, auf den Sensor ab.

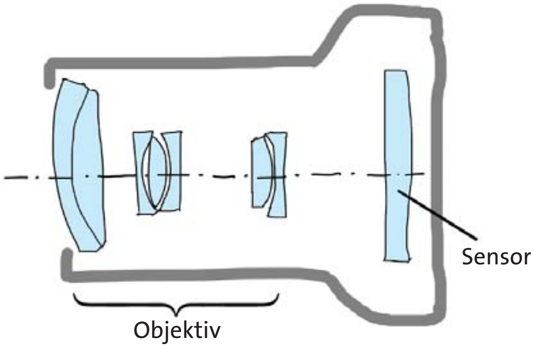


Abb. 22.28 Vierlinsiges Objektiv eines Fotoapparats

Damit das Bild des Gegenstandes, den man fotografieren möchte, scharf wird, muss die Bildweite den richtigen Wert haben.

Im Normalzustand ist der Lichtweg durch den Verschluss versperrt. Um eine Aufnahme zu machen, betätigt man den Auslöser. Dabei wird der Verschluss für eine sehr kurze Zeit geöffnet. Je kürzer die Belichtungszeit, desto geringer ist die Gefahr, das Bild zu verwackeln. Für nicht zu schnell bewegte Gegenstände ist 1/60 Sekunde ausreichend.

Außer Belichtungszeit und Entfernung muss noch eine dritte Einstellung vorgenommen werden. Im Objektiv befindet sich eine kreisförmige Blende, deren Durchmesser verstellt werden kann. Je größer die Blendenöffnung, desto mehr Licht geht durch das Objektiv, desto geringer ist aber die Schärfentiefe.

Die drei Einstellungen — Entfernung, Belichtungszeit und Blendenöffnung — werden meist automatisch vorgenommen. Damit das möglich ist, hat die Kamera einen Belichtungsmesser zur Messung der Helligkeit und einen Entfernungsmesser.

Die meisten Kameras haben ein Zoom-Objektiv. Man kann daher noch die Brennweite des Objektivs einstellen.

Da die Gegenstände, die man fotografiert, immer weit vom Objektiv entfernt sind, ist die Bildweite nicht sehr verschieden von der Brennweite:

$$b \approx f.$$

Abb. 22.29 zeigt, wie ein und derselbe Gegenstand aus derselben Entfernung mit drei verschieden eingestellten Brennweiten aufgenommen wird. Im oberen Teilbild hat das Objektiv die größte Brennweite, im unteren die kleinste. Man sieht, dass das Bild des Gegenstandes umso größer ist, je größer die Brennweite (je kleiner die Brechkraft) des Objektivs ist.

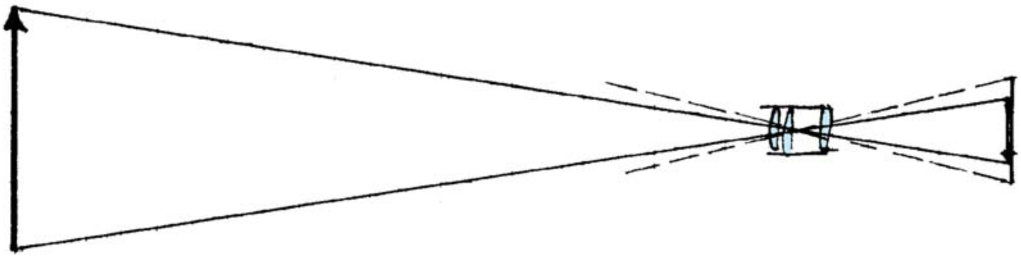
Dass ein Gegenstand auf dem Sensor ein großes Bild erzeugt, bedeutet aber auch, dass der Winkelbereich, den der Fotoapparat „sieht", klein ist. Mit einer groß eingestellten Brennweite nimmt man also einen kleinen Winkelbereich auf, bei kleiner Brennweite einen großen.

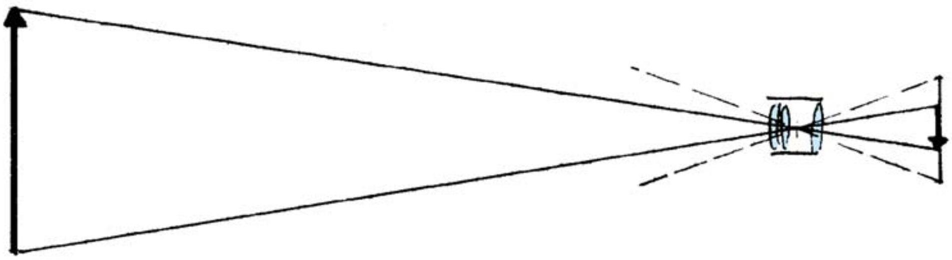
Bei einer sogenannten Systemkamera kann man das Objektiv auswechseln. Man kann also das normale Objektiv ersetzen, etwa durch ein Objektiv mit besonders großer, oder mit besonders kleiner Brennweite.

Objektive großer Brennweite „holen die Gegenstände nah heran". Man nennt sie Teleobjektive. Objektive kleiner Brennweite nehmen einen großen Winkelbereich auf. Man nennt sie Weitwinkelobjektive.

Wir fassen zusammen:

> Je größer die Brennweite, desto größer das Bild eines Gegenstandes.

a)


b)


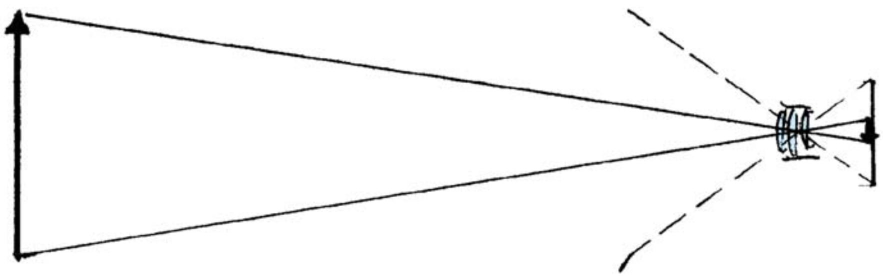
c)


Abb. 22.29 Ein und derselbe Gegenstand wird mit Objektiven drei verschiedener Brennweiten aufgenommen. (a) Teleobjektiv; (b) Normalobjektiv; (c) Weitwinkelobjektiv

22.12 Das Auge

Das Auge ist der Fotokamera ähnlich, Abb. 22.30. Das Licht tritt durch die Pupille in den Augapfel ein. Das Bild entsteht auf der Netzhaut. Hinter der Iris (der Blende, durch die die Pupillenöffnung kleiner und größer gemacht werden kann) befindet sich die Linse. Das Material, das sich in den Räumen zwischen Hornhaut und Linse und zwischen Linse und Netzhaut befindet, ist im Wesentlichen Wasser. Die optische Dichte des Linsenmaterials ist etwas größer als die des Wassers. Die Brechung geschieht zum größten Teil beim Eintritt in die Hornhaut (Brechkraft etwa 43 dpt). Die Linse trägt nur zum kleineren Teil zur optischen Abbildung bei. Ihre wichtigste Funktion ist das „Scharfstellen". Durch Anspannen des Ringmuskels kann die Brechkraft der Linse vergrößert werden (von 15 auf 27 dpt).

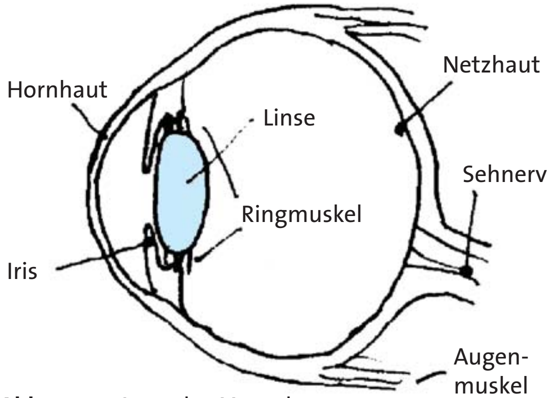


Abb. 22.30 Auge des Menschen

Ist der Ringmuskel entspannt, so werden sehr weit entfernte Gegenstände scharf auf der Netzhaut abgebildet. Bei angespanntem Muskel werden näher liegende Gegenstände scharf abgebildet. Die kleinste Entfernung, in der man einen Gegenstand noch scharf erkennt, beträgt etwa 10 cm. Probiere es selbst aus.

Die Netzhaut ist der eigentliche Datenempfänger: der Empfänger für die Daten, die mit dem Träger Licht ins Auge kommen. Die Netzhaut enthält eine sehr große Zahl von Einzelempfängern. Von diesen laufen die Daten über den Sehnerv zum Gehirn.

22.13 Brille und Lupe

Die Brille

Ist der Ringmuskel des Auges entspannt, so soll ein weit entfernter Gegenstand ein scharfes Bild auf der Netzhaut liefern.

Bei Kurzsichtigen ist der Augapfel zu lang, das Bild eines weit entfernten Objekts entsteht daher vor der Netzhaut. In anderen Worten: Das Netzhautbild ist unscharf, Abb. 22.31a. Um ein scharfes Bild zu erhalten, müsste die Brechkraft der Linse vermindert werden. Durch Spannen des Ringmuskels ist das aber nicht zu erreichen — das würde ja die Brechkraft vergrößern, das Bild würde noch unschärfer. Was man braucht, ist eine Brille, die Linsen mit negativer Brechkraft hat, Abb. 22.31b.

Bei Weitsichtigen ist der Augapfel zu kurz, Abb. 22.31c. Die Folge: Erstens muss der Ringmuskel gespannt werden, damit ein weit entferntes Objekt ein scharfes Bild liefert, und zweitens

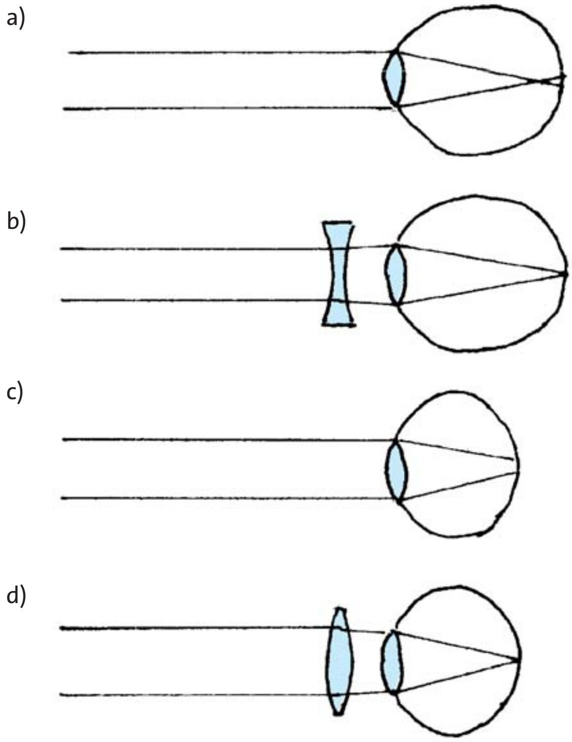


Abb. 22.31 (a) Bei Kurzsichtigen ist der Augapfel zu lang; (b) Korrektur mit einer Linse negativer Brechkraft; (c) bei Weitsichtigen ist der Augapfel zu kurz; (d) Korrektur mit einer Linse positiver Brechkraft

ist die kleinste Entfernung, in der man noch scharf sieht, größer als bei Normalsichtigen. Weitsichtigkeit lässt sich dadurch korrigieren, dass man eine Brille mit positiver Brechkraft trägt, Abb. 22.31d.

Mit zunehmendem Alter verliert die Augenlinse ihre Elastizität, ihre Brechkraft kann durch Anspannen des Ringmuskels nicht mehr so stark vergrößert werden wie bei einem jungen Menschen. Der Mensch kann daher nahe Gegenstände nicht mehr scharf sehen. Auch hier hilft eine Brille mit positiver Brechkraft. Diese wird aber nur gebraucht, solange die Person nahe Gegenstände anschaut, beim Lesen zum Beispiel. Beim Betrachten weiter entfernter Gegenstände muss die Brille abgesetzt werden, oder … siehe Abb. 22.32.

Abb. 22.32 An welchem Augenfehler leidet der Mann?

Die Lupe

Um einen Gegenstand möglichst groß zu sehen, holt man ihn so nah wie möglich an die Augen heran — so nah, dass man es gerade noch schafft, ihn scharf zu sehen. Um ihn noch größer zu sehen, müsste man ihn noch näher heranholen. Dann würde das Bild aber unscharf, denn die Brechkraft der Augenlinse ist nicht groß genug. Man kann sich aber leicht helfen, indem man durch eine Lupe schaut. Eine Lupe ist nichts anderes als eine Linse positiver Brechkraft. Die Brechkraft von Auge und Lupe zusammen ist dann größer als die des Auges allein. Eine Lupe hat also dieselbe Funktion wie eine Brille für Weitsichtige.

Aufgaben

1. Wie siehst du einer Brille an, ob sie einer kurzsichtigen oder einer weitsichtigen Person gehört?
2. Versuche mit deiner eigenen oder mit einer geliehenen Brille eine leuchtende Glühlampe auf eine weiße Wand abzubilden. Es kann sein, dass es dir nicht gelingt. Woran könnte das liegen?
3. Man kann eine Lupe als Brennglas benutzen. Die Lupe konzentriert das Sonnenlicht auf einen kleinen Fleck. Welche Form hat dieser Fleck? Warum hat er diese Form?

22.14 Videoprojektoren

Wir stellen uns vor, es gebe noch keine Projektoren, und wir wollten selbst einen erfinden. Die einfachste Idee wäre wohl die: Wir nehmen ein kleines Papierbild, beleuchten es möglichst gut und bilden es mithilfe eines Objektivs auf eine Leinwand ab, Abb. 22.33a.

Solche Geräte, mit denen man Papierbilder projizieren kann, gab es früher tatsächlich. Sie heißen Episkope. Du wirst gleich sehen, warum sie nicht mehr in Gebrauch sind. In Abb. 22.33b ist dargestellt, wohin das Licht geht, das von den Lampen auf einen bestimmten Punkt P der Bildvorlage fällt. Nur ein sehr geringer Anteil dieses Lichts gelangt durch das Objektiv auf die Leinwand. Der größte Teil geht daneben, er wird an den Innenwänden des Projektors absorbiert. Die Ursache hierfür ist, dass das Papier das Licht streut. Es wird in alle Richtungen zurückgeworfen, statt dahin wo wir es haben möchten, nämlich zum Objektiv.

Daher unsere nächste Idee: Wir verwenden als Vorlage nicht ein Papierbild, sondern ein Bild, das das Licht nicht streut: Wir erfinden das Diapositiv oder kurz Dia. Am Diapositiv wird das Licht entweder absorbiert oder geradeaus durchgelassen — aber nicht gestreut.

Unseren ersten Versuch, einen Diaprojektor zu bauen, zeigt Abb. 22.33c. Auf den ersten Blick scheint der Projektor nicht schlecht zu sein. Das ganze Licht, das von Punkt A des Dias ausgeht, gelangt durch das Objektiv auf die Leinwand. Genauso wie auch das Licht, das von den Punkten B und C ausgeht. Aber dann hört es auch schon auf. Das Licht, das von den Punkten außerhalb von B

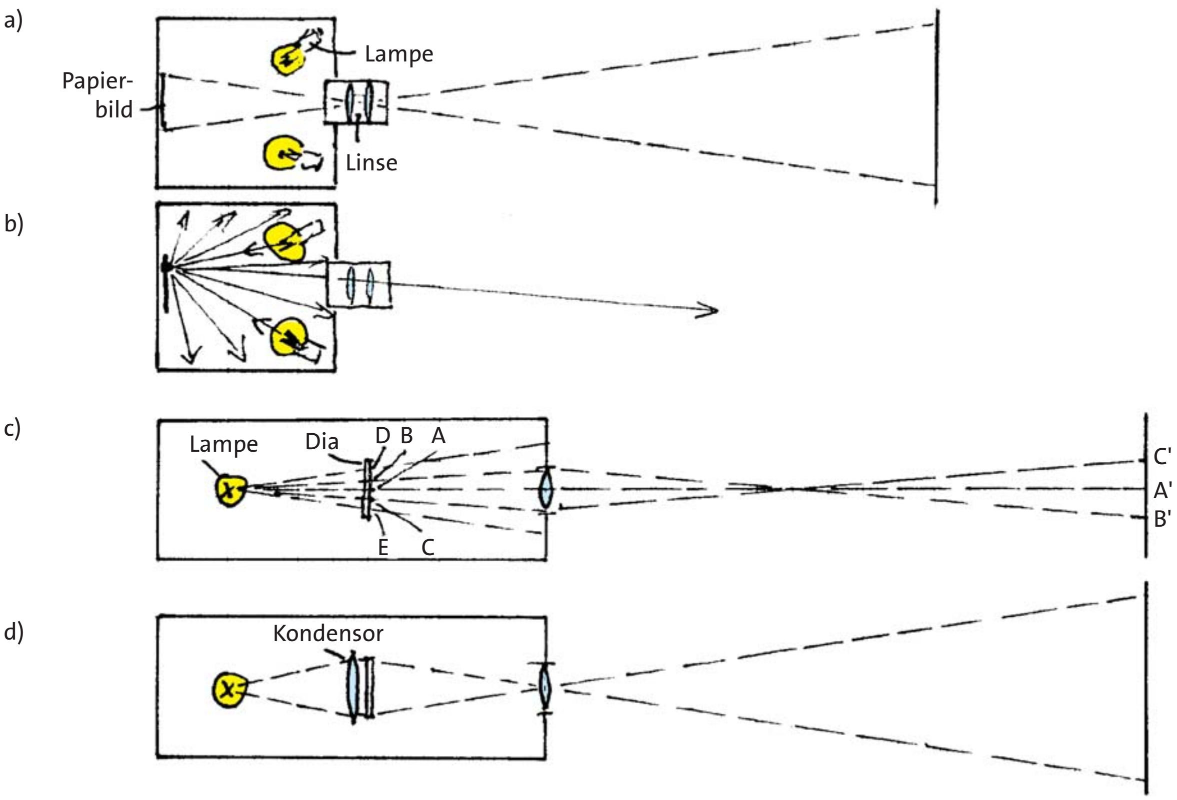


Abb. 22.33 (a) Episkop (b) Beim Episkop geht das meiste Licht verloren. (c) Im Dia wird das Licht nicht gestreut. Nur das Zentrum des Dias wird abgebildet. (d) Der Kondensor lenkt alles Licht, das das Dia durchquert, zum Objektiv.

und C kommt, also von D und E zum Beispiel, fällt nicht mehr auf das Objektiv, es trifft daneben. Was wir auf der Leinwand sehen, ist ein schönes helles Bild – allerdings nur von einem kreisförmigen Bereich in der Mitte des Dias.

Wir erfinden daher als Nächstes den Kondensor, eine große Linse, die dicht vor dem Dia steht, Abb. 22.33d. Sie knickt die von der Lampe kommenden Lichtstrahlen so ab, dass sie alle durch das Objektiv gehen. Wie du anhand von Abb. 22.33d siehst, bedeutet das auch, dass die Lichtquelle auf das Objektiv abgebildet wird.

Noch ein letzter Schritt auf dem Weg zu einem modernen Projektor: Man stellt hinter die Lampe einen gekrümmten Spiegel, sodass auch das Licht, das die Lampe nach hinten schickt, durch das Dia zum Objektiv gelangt.

Der Videoprojektor oder Beamer ist, was die Optik betrifft, im Wesentlichen so aufgebaut wie der alte Diaprojektor, nur wird statt des Dias eine LCD-Matrix projiziert.

Aufgaben

1. Ein Beamer soll möglichst viel Licht auf die Leinwand bringen. Also, so könnte man vermuten, muss das Objektiv einen möglichst großen Durchmesser haben. Tatsächlich braucht es das nicht. Warum nicht?
2. Episkope hatten Objektive mit sehr großem Durchmesser. Warum?
3. Ein Beamer soll auf einer Leinwand, die sich in 5 m Abstand vom Projektor befindet, ein 2,40 m hohes Bild erzeugen. Welche Brennweite muss sein Objektiv haben? (Die Höhe des LCD-Matrix-Dias ist 24 mm.)

22.15 Das Mikroskop

Um ein großes Bild von einem kleinen Gegenstand zu erhalten, muss man den Gegenstand dicht vor die Brennebene der abbildenden Linse bringen, Abb. 22.34a. Das „Gerät“ von Abb. 22.34a ist fast schon ein Mikroskop. Tatsächlich fängt man bei einem Mikroskop aber das Bild nicht mit

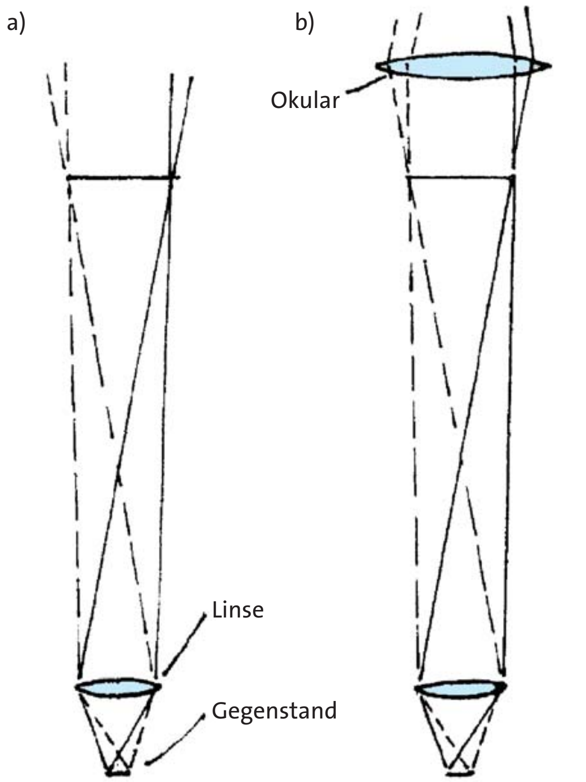


Abb. 22.34 Mikroskop. (a) Der Gegenstand befindet sich nahe der Brennebene. (b) Das Bild wird durch eine Lupe (das Okular) betrachtet.

einem Schirm auf, sondern man sieht es sich direkt mit dem Auge an. Man schaut dazu von oben in das Mikroskop hinein.

Damit man das Bild möglichst groß sieht, d. h. damit man mit dem Auge möglichst nah an das Bild herangehen kann, betrachtet man es durch eine Lupe, Abb. 22.34b. Diese Lupe ist fester Bestandteil des Mikroskops. Man nennt sie Okular.

22.16 Das Fernrohr

Ein Fernrohr dient dazu, von einem weit entfernten Gegenstand ein großes Bild zu machen.

Wir hatten früher gesehen, dass das Bild umso größer ist, je größer die Brennweite der verwendeten Linse oder des Objektivs ist.

Beim Fernrohr fängt man nun das Bild gewöhnlich nicht auf einem Schirm oder auf einem Film auf, sondern man betrachtet es direkt von hinten. Um das Bild möglichst groß zu sehen, betrachtet man es, genauso wie beim Mikroskop, durch eine Lupe, ein Okular, Abb. 22.35.

22.17 Teleskope

Im Grunde ist ein Teleskop nichts anderes als ein großes Fernglas, oder auch als eine Fotokamera mit einem Teleobjektiv sehr großer Brennweite. Teleskope werden für die Beobachtung des Himmels gebaut.

Bei der Beobachtung von Sternen gibt es ein besonderes Problem. Betrachtet man den Nachthimmel mit bloßem Auge, so sieht man bestenfalls etwa 3000 Sterne – und das ist nur ein winzig kleiner Bruchteil aller Sterne, die es gibt. Wir sehen die meisten Sterne deshalb nicht, weil sie so weit von uns entfernt sind und daher so wenig Licht von ihnen zu uns kommt. Um weit entfernte Sterne sichtbar zu machen, macht man daher eine Abbildung mit einem Objektiv sehr großer Querschnittsfläche. Je größer die Querschnittsfläche, desto mehr Licht trägt zur Abbildung bei.

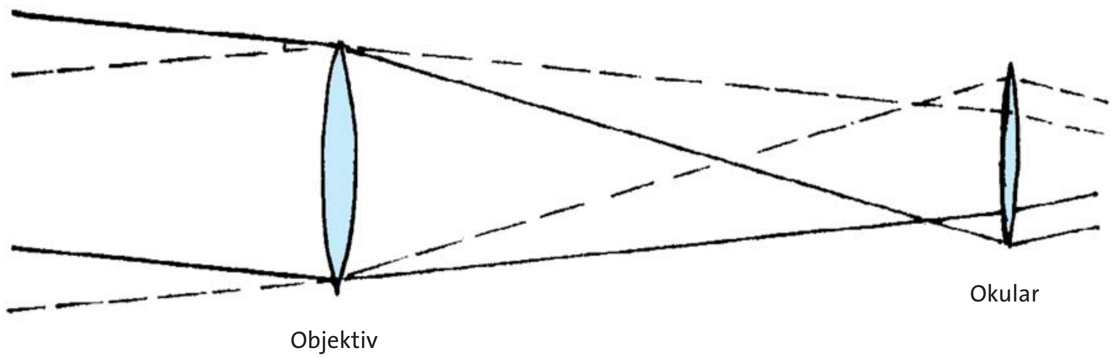


Abb. 22.35 Fernrohr. Eine Linse großer Brennweite erzeugt ein Bild. Dieses wird durch eine Lupe (Okular) betrachtet.

Teleskope

Man kann Linsen mit einem Durchmesser von höchstens 1 m herstellen. Für noch größere Teleskope verwendet man statt Linsen Parabolspiegel. Wie eine Linse, so macht auch ein Parabolspiegel eine optische Abbildung.

Die größten existierenden Spiegelteleskope haben einen Durchmesser von etwa 10 m. Noch größere Teleskope mit Spiegeldurchmessern bis zu 40 m befinden sich im Bau.

Aus dem Universum kommt nicht nur sichtbares Licht zur Erde. Es kommen auch viele unsichtbare Lichtsorten. Alle diese Strahlungen bringen uns interessante Informationen über den Aufbau des Universums und über merkwürdige Vorgänge, die in anderen Sternen und Galaxien ablaufen. Man untersucht daher die verschiedensten Strahlungen, die aus dem Kosmos zur Erde gelangen.

Für jede dieser Strahlungen, dieser Lichtsorten, braucht man eine besondere Art von Teleskop: Geräte, die eine optische Abbildung machen und für diese Abbildung möglichst viel von der entsprechenden Strahlung einsammeln.

Den gewöhnlichen optischen Teleskopen sehr ähnlich sind die Radioteleskope, Geräte, mit denen Strahlung gesammelt wird, deren Wellenlänge viel größer ist als die des sichtbaren Lichts. Als Spiegel für diese Strahlung eignen sich einfache Drahtnetze. Es ist daher viel leichter, sehr große Parabolspiegel für diese Strahlung zu bauen als für sichtbares Licht. Das größte existierende Radioteleskop hat einen Spiegeldurchmesser von 100 m.

Aufgaben

1. Man kann die Parabolantenne für Satellitenfernsehen als Radioteleskop auffassen. Was kann man mit ihr beobachten und wie?

2. Die Pupille des menschlichen Auges hat einen maximalen Durchmesser von 8 mm. Wie viel mal mehr Licht als das Auge sammelt ein Spiegelteleskop mit einem Durchmesser von 6 m ein?

23 FARBEN

23.1 Der dreidimensionale Farbraum

Das Wort Farbe bezeichnet zweierlei: einmal einen Farbstoff, z. B. Ölfarbe oder Wasserfarbe, und zum anderen einen Farbeindruck, z. B. Grün oder Blau. Wir benutzen das Wort hier nur im Sinn von Farbeindruck oder Farbempfindung. In anderen Sprachen gibt es diese doppelte Bedeutung nicht. Die Farbe, die man zum Anstreichen benutzt, heißt im Englischen „paint“ und im Französischen „peinture“. Der Farbeindruck heißt „colour“ bzw. „couleur“.

Wir diskutieren im Folgenden die Farbempfindungen, die Licht über unsere Augen hervorruft. Unser Thema ist also nicht das ganze Bild, das auf der Netzhaut entsteht, sondern nur eine einzige Stelle des Bildes.

Die Farbempfindung hängt davon ab, um was für Licht es sich handelt. Im Allgemeinen trifft nun nicht eine einzige, reine Lichtsorte in unsere Augen (auf eine bestimmte Stelle der Netzhaut), sondern ein Lichtgemisch. Man könnte denken, dass unterschiedliche Lichtgemische immer unterschiedliche Farbempfindungen hervorrufen. Das ist aber nicht so. Es gibt viel weniger verschiedene Farbempfindungen als Lichtgemische. In anderen Worten: Viele, sehr verschiedene Lichtgemische rufen dieselbe Farbempfindung hervor.

Wir beschäftigen uns zunächst nur mit den Farbempfindungen und fragen noch nicht danach, welchen Lichtsorten eine bestimmte Empfindung entspricht.

Wir beginnen mit der Diskussion eines häufig auftretenden Problems: Ein bestimmter Farbeindruck soll „übertragen“ werden. Ein Beispiel: Du möchtest deiner Freundin am Telefon beschreiben, welche Farbe dein neues T-Shirt hat. Und noch ein anderes Beispiel: Der Fernsehsender muss dem Fernsehempfänger ständig „mitteilen“, welche Farben die einzelnen Bildpunkte oder Pixel auf dem Bildschirm haben sollen.

Wir wollen herausfinden, wie eine solche Mitteilung oder Übertragung geschehen kann. Um das Problem deutlicher zu machen, betrachten wir vorher noch eine andere Situation, bei der aber dieselbe Schwierigkeit auftritt.

Du wohnst in einem kleinen Dorf und möchtest einem Freund in Amerika erklären, wo du wohnst. Dafür gibt es unter anderen die beiden folgenden Möglichkeiten:

- Du nennst ihm den Namen des Dorfes;
- du gibst die geographische Breite und die geographische Länge des Dorfes an.

Wenn du die erste Methode anwendest, muss dein amerikanischer Freund in einem Register nach deinem Dorf suchen. Dort stehen die Koordinaten, die es ihm gestatten, das Dorf auf einer Landkarte zu finden.

Die zweite Methode ist insofern einfacher, als es genügt, zwei Zahlen zu nennen. Wir können das auch so ausdrücken: Es gibt zwei Skalen oder

Koordinatenachsen, die geographische Breite und die geographische Länge. Geben wir an, an welcher Stelle der beiden Skalen das Dorf liegt, so haben wir seinen Ort eindeutig beschrieben.

Nun zurück zu den Farben. Du möchtest also deiner Freundin die Farbe deines T-Shirts mitteilen. Die Situation ist ganz ähnlich wie bei der Beschreibung der Lage deines Dorfes. Es gibt eine riesige Liste mit Farbnamen: Gelb, Rot, Blau, Orange, Ocker, Pink, Oliv und viele andere jedem bekannte Namen, aber auch Namen, die weniger gebräuchlich sind und die Farben genauer beschreiben, wie Cadmiumgelb, Chromoxidgrün oder Sepia.

Abb. 23.1 Eine Farbe durch einen Eigennamen zu beschreiben ist umständlich.

Statt das Dorf mit seinem Eigennamen zu bezeichnen, kann man seine Koordinaten angeben. Statt eine Farbe mit einem Eigennamen zu bezeichnen, Abb. 23.1, kann man auch jede Farbe durch Koordinaten beschreiben.

Und noch einmal eine kurze Abschweifung von den Farben: Um jemandem mitzuteilen, wie warm es ist, genügt es, eine einzige Angabe zu machen: die Temperatur. Man braucht eine einzige Skala.

Um jemandem mitzuteilen, wo wir wohnen, müssen wir zwei Angaben machen: die geographische Länge und die geographische Breite. Man braucht zwei Skalen.

Wenn der Flugkapitän dem Tower die Position seines Flugzeugs mitteilen will, muss er drei Angaben machen: geographische Länge, geographische Breite und Flughöhe. Man braucht drei Skalen.

Und wieder zurück zu den Farben. Wie viele Angaben muss man machen, um eine Farbe zu beschreiben? Wie viele Skalen braucht man, um einen Farbeindruck eindeutig einzuordnen?

Sicher hast du schon einmal einen Satz Filzstifte gehabt. Und sicher hast du auch versucht, die Stifte in einer einzigen Reihe anzuordnen. Und sicher ist es dir nicht gelungen. Violett — Blau — Türkis — Grün — etc. Viele der Stifte passten gut in die Reihe, aber da war noch ein dunkelblauer, der weder zwischen Violett und Blau, noch zwischen Blau und Türkis gehörte.

Diese Feststellung bedeutet, dass es nicht möglich ist, alle Farben auf einer einzigen Skala anzuordnen. Man braucht mehr als nur eine Koordinatenachse. In anderen Worten: Der Farbraum ist nicht eindimensional.

Du könntest es mit zwei Skalen, mit einer zweidimensionalen Anordnung versuchen. Aber auch das würde dir nicht gelingen. Was man braucht, sind drei Skalen.

Farbeindrücke können sich in drei verschiedenen Eigenschaften voneinander unterscheiden. Diese Eigenschaften sind der Farbton, die Sättigung und die Helligkeit.

Der Farbraum ist dreidimensional.

Stell dir vor, wir haben eine sehr große Zahl verschiedenfarbiger Würfel vor uns. Alles, was es an deutlich unterscheidbaren Farben gibt, soll vertreten sein.

Wir nehmen nun zuerst alle Würfel mit einer kräftigen, leuchtenden Farbe heraus. Diese allein

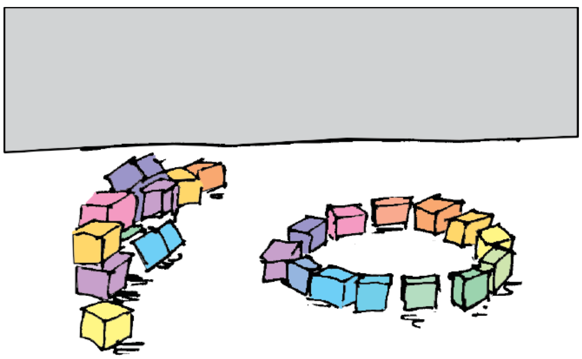


Abb. 23.2 Alle kräftigen Farben lassen sich auf einer geschlossenen Skala, dem Farbenkreis, anordnen.

lassen sich in einer Reihe anordnen. Das Interessante an dieser Reihe ist, dass man sie zu einem Kreis schließen kann, Abb. 23.2. Man nennt diesen Kreis den Farbenkreis.

Die verschiedenen Würfel auf dem Farbenkreis unterscheiden sich im Farbton. Die Farben auf dem Farbenkreis gehen stetig, kontinuierlich ineinander über. Wir versehen zwölf der Farben des Kreises mit eigenen Namen, Abb. 23.3: Rot — Orangerot — Orange — Gelb — Gelbgrün — Grün — Türkis — Cyan — Blau — Blauviolett — Purpur — Magenta

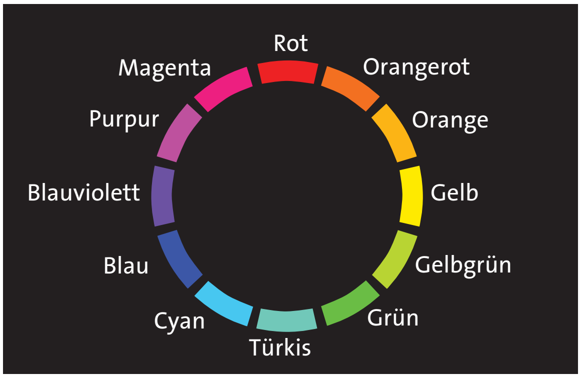


Abb. 23.3 Der Farbenkreis

Statt dieser Namen hätten wir auch einfach die Zahlen 1 bis 12 an den Farbenkreis schreiben können.

Wir finden nun in unserem Würfelhaufen zu jedem Farbton noch andere Würfel. Zum Beispiel zu unserem kräftig leuchtend blauen Würfel finden wir noch andere, die auch blau sind, aber blasser, und wieder andere, die dunkler sind. Aber auch solche, die sowohl blasser als auch dunkler sind. „Blass" und „dunkel" sind zwei Eigenschaften, die sich nicht gegenseitig ausschließen.

Allein die hellen unter diesen blauen Würfeln lassen sich wieder in einer Reihe anordnen. An einem Ende steht der kräftig blaue, dazwischen die pastellblauen und am anderen Ende steht Weiß. So gibt es von jeder kräftigen Farbe aus einen stetigen Übergang zu Weiß. Man sagt, beim Übergang von der kräftigen Farbe zu Weiß ändere sich die Sättigung. Die kräftige Farbe ist die gesättigte, Weiß ist die völlig ungesättigte. Wir stellen die Würfel mit den blassen Farben in den Kreis der kräftigen Farben hinein, sodass die Sättigung zur Mitte hin abnimmt. Ganz in der Mitte befindet sich der weiße Würfel. Wir haben eine Farbscheibe erhalten, Abb. 23.4.

Abb. 23.4 Farbscheibe. Die Farben sind außen kräftig und werden zur Mitte hin blasser.

Schließlich finden wir zu jedem der blauen Würfel unterschiedlicher Sättigung noch verschiedene andere, die zwar dieselbe Sättigung haben, sich aber in der Helligkeit unterscheiden. Je geringer die Helligkeit, desto „schwärzer" ist der Würfel.

Wir benutzen hier das Wort „hell" in einem etwas anderen Sinn als es sonst im Zusammenhang mit Farben üblich ist: Was man umgangssprachlich Hellblau nennt, ist ein blasses, d. h. ein ungesättigtes Blau. Wir wollen aber hier von einem hellen Blau sprechen, wenn von der entsprechenden Stelle viel blaues Licht kommt.

Ein Farbeindruck lässt sich damit durch die drei Angaben „Farbton", „Sättigung" und „Helligkeit" charakterisieren. Das bedeutet, dass wir aus unseren Würfeln ein dreidimensionales Gebilde bauen können, das ungefähr einen Zylinder darstellt,

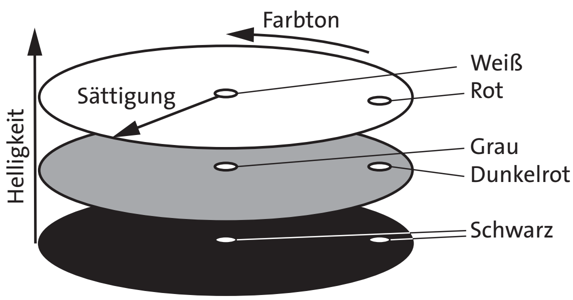


Abb. 23.5 Der Farbzylinder ist ein Modell des dreidimensionalen Farbraums.

Abb. 23.5. Am oberen, äußeren Rand liegen die gesättigten, hellen Farben. Nach der Mitte zu nimmt die Sättigung ab, genau in der Mitte oben befindet sich Weiß. Nach unten hin nimmt die Helligkeit ab. Auf der Zylinderachse liegt oben Weiß, und nach unten schließen sich immer dunkler werdende Grautöne an. Die ganze untere Fläche des Zylinders ist schwarz. Dieser Zylinder stellt ein Modell für den dreidimensionalen Farbraum dar.

Wir benutzen die 12 Farbnamen in Abb. 23.3 als Bezeichnung eines Farbtons. „Blau“ bedeutet also nicht nur das kräftige, helle Blau, sondern auch das blasse und das dunkle.

In der Umgangssprache gibt es viele Farbnamen, die nicht nur den Farbton, sondern auch die Sättigung, die Helligkeit oder beides festlegen. In Tab. 23.1 sind einige Beispiele aufgeführt.

Name	Farbton	Sättigung	Helligkeit
Oliv	Grüngelb	stark	mittel
Beige	Gelb	schwach	mittel
Rosa	Rot	schwach	stark
Braun	Orange	stark	schwach

Tab. 23.1 Farbton, Sättigung und Helligkeit einiger bekannter Farben

Du solltest nun in der Lage sein, jeden beliebigen Farbeindruck durch die Angabe von Farbton, Sättigung und Helligkeit zu beschreiben, und zwar auch „schmutzige“ oder „undefinierbare“ Farben.

> Farbeindrücke können sich in drei Eigenschaften unterscheiden: im Farbton, in der Sättigung und in der Helligkeit.

Aufgaben

1. Statt als Zylinder könnte man den Farbraum noch auf verschiedene andere Arten darstellen. Wie?
2. Diskutiere die Frage nach Anfang und Ende der Skalen für Farbton, Sättigung und Helligkeit.
3. Die Farbtonskala ist eine in sich geschlossene Skala. Nenne eine andere Größe, deren Werte auf einer geschlossenen Skala liegen.
4. Beschreibe die Farben der folgenden Dinge durch die qualitative Angabe von Farbton, Sättigung und Helligkeit: Brötchen, Kakaopulver, Trinkschokolade, Cola, Artischocke, deine Haut, Zinkdachrinne, Rost, Fußboden, Wände und Decke des Klassenzimmers, Eisenbahnwagen.

23.2 Das Mischen von Licht

Wir experimentieren mit zwei Diaprojektoren. Aber dort, wo man normalerweise das Dia hineinschiebt, setzen wir ein Farbfilter ein. Jeder der beiden Projektoren erzeugt an der Wand ein farbiges Quadrat. Wir orientieren die Projektoren so, dass sich die Quadrate etwas überlappen, Abb. 23.6.

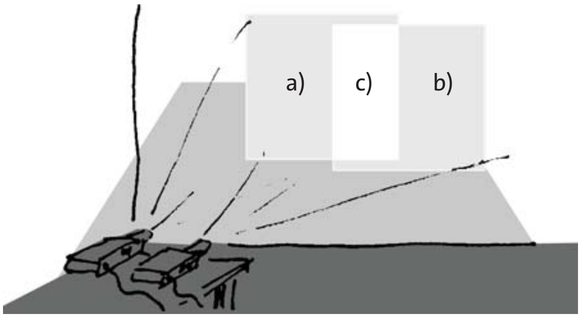


Abb. 23.6 Die hellen Quadrate, die die beiden Projektoren an der Wand erzeugen, überlappen sich im Bereich c).

Von Bereich (a) wird Licht zurückgestreut, das von dem einen Projektor kommt, von Bereich (b) Licht, das vom anderen kommt. Vom Überlappungsbereich (c) werden beide Lichtsorten gleichzeitig zurückgestreut. Wir nennen die Farben der drei Lichtsorten A, B und C. Das Licht, das von (c) kommt, ist ein Gemisch der Lichter, die von (a) und (b) kommen.

Wir benutzen die Projektoren zunächst, um noch einmal die Bedeutung der Begriffe Helligkeit und Sättigung zu zeigen.

In beide Projektoren wird ein grünes Filter eingeschoben. Die Farben A und B sind ein gesättigtes Grün. Welche Farbe C hat das Licht, das vom Bereich (c) kommt? Farbton und Sättigung von C müssen dieselben sein wie die von A und B. Allerdings kommt von jedem Quadratzentimeter von (c) doppelt so viel Licht wie von einem Quadratzentimeter von (a) oder von (b). C unterscheidet sich also von A und B in der Helligkeit, Abb. 23.7.

Wir nehmen nun eines der Filter heraus. Von dem entsprechenden Projektor kommt jetzt weißes Licht zur Wand. Das Licht von Bereich (a) ist gesättigt grün, und das von (b) ist weiß. Der Überlappungsbereich (c) sieht blassgrün aus. Die Farbe C ist also ein schwach gesättigtes Grün. C

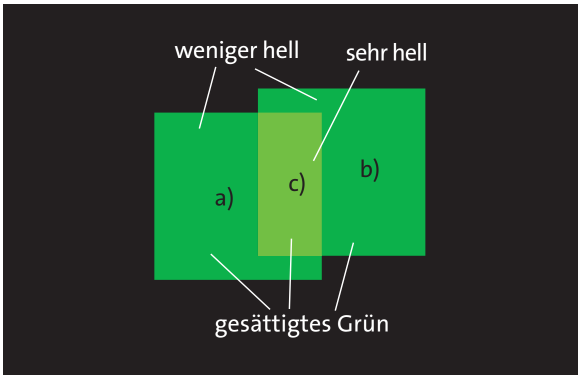


Abb. 23.7 Im Überlappungsbereich (c) ist die Helligkeit größer als in (a) und in (b).

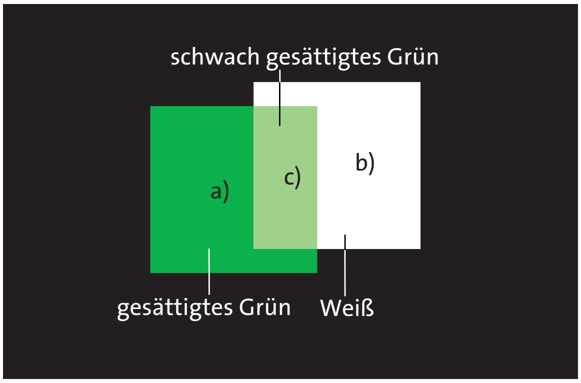


Abb. 23.8 Das Grün in (a) ist gesättigt. Das Grün im Überlappungsbereich (c) hat eine schwache Sättigung.

hat außerdem eine größere Helligkeit als A und auch als B, Abb. 23.8. Man verringert also die Sättigung der Farbe von Licht, wenn man weißes Licht hinzumischt.

Wir machen nun etwas kompliziertere Mischungen. In die Projektoren werden verschiedene Farbfilter eingeschoben. Wir beginnen mit einem Rotfilter in dem einen Projektor und einem Gelbfilter im anderen. Die Farbe A ist Rot, die Farbe B Gelb und die Farbe C Orange, Abb. 23.9.

Du wirst dich über die Beobachtung nicht wundern. Trotzdem ist es Wert, eine kleine Überlegung dazu anzustellen. Der Bereich (c) erscheint in einer einzigen Farbe, nämlich Orange. Wir sehen nicht die Farben Rot und Gelb einzeln. Unsere Augen „arbeiten“ also anders als unser Gehör. Wenn aus dem Lautsprecher gleichzeitig Töne kommen, die auf verschiedenen Instrumenten gespielt werden, so hören wir die einzelnen Instrumente heraus.

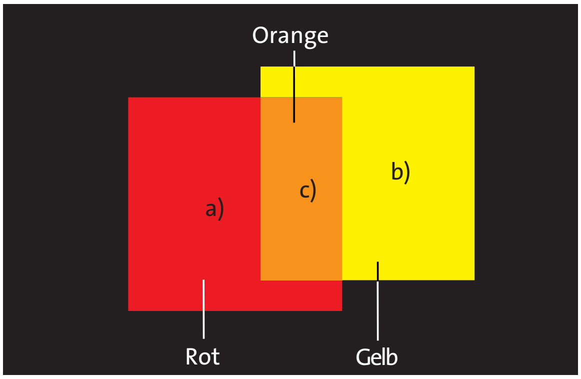


Abb. 23.9 Obwohl aus dem Überlappungsbereich zwei Lichtsorten kommen, erzeugt das Licht nur einen einzigen Farbeindruck.

Wir benutzen für die folgenden Experimente nur solche Filter, die an der Wand eine gesättigte Farbe hervorrufen, solange ihr Licht nicht mit anderen Lichtsorten gemischt wird.

Es stellt sich heraus, dass man die Mischfarbe von zwei Lichtsorten leicht mithilfe der Farbscheibe voraussagen kann.

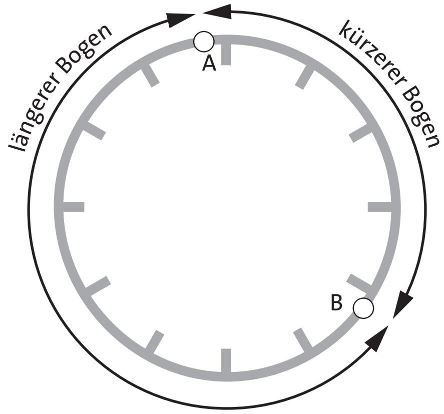


Abb. 23.10 Die beiden Farben A und B stehen auf dem Farbenkreis über zwei Kreisbogen miteinander in Verbindung.

Zwei beliebige Farbeindrücke A und B sind auf dem Farbenkreis durch zwei Kreisbogen miteinander verbunden, Abb. 23.10. Wenn sich A und B nicht gegenüberliegen, ist der eine Bogen kürzer als der andere. Der Farbton der Mischfarbe von A und B ist immer ein Farbton des kürzeren Bogens. Die Mischfarbe ist gesättigt, wenn A und B sehr nah beieinander liegen, wenn also der kürzere Bogen sehr kurz ist.

Je länger der kürzere Bogen ist, desto ungesättigter ist die Mischfarbe C. Liegen sich A und B gegenüber, so ist die Mischfarbe völlig ungesättigt: Sie ist Weiß.

Beispiele: Orange und Gelbgrün liegen recht dicht beieinander. Die Mischfarbe ist ein ziemlich gesättigtes Gelb, Abb. 23.11a. Orangerot und Grün sind weiter voneinander entfernt. Die Mischfarbe ist wieder Gelb, aber ein weniger gesättigtes als vorher, Abb. 23.11b. Rot und Türkis schließlich sind noch weiter voneinander entfernt; weiter können zwei Farben auf dem Kreis gar nicht voneinander entfernt sein. Die Mischfarbe ist völlig ungesättigt, d. h. Weiß, Abb. 23.11c.

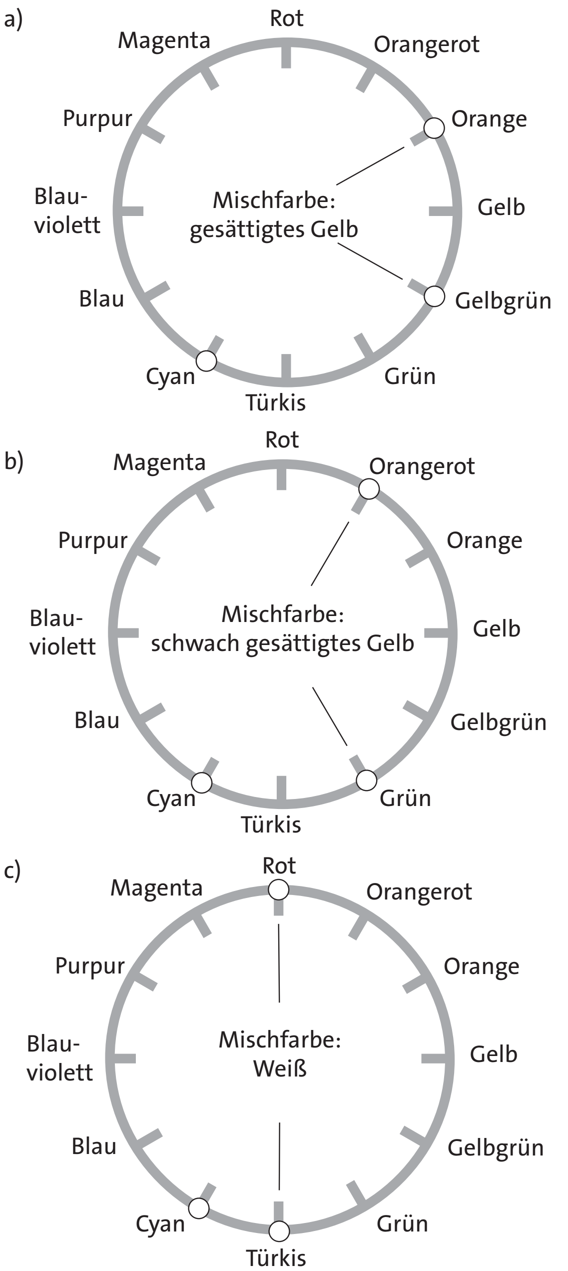


Abb. 23.11 (a) Orange + Gelbgrün = gesättigtes Gelb (b) Orangerot + Grün = schwach gesättigtes Gelb (c) Rot + Türkis = völlig ungesättigtes Gelb = Weiß

Die Farbe B, die mit Farbe A gemischt Weiß ergibt, nennt man die Komplementärfarbe zu A. So ist Blauviolett die Komplementärfarbe zu Gelb, Magenta die zu Grün, und Rot ist die Komplementärfarbe zu Türkis.

Dass die auf dem Farbenkreis gegenüberliegenden Farben gerade Weiß ergeben ist kein Zufall: Die genaue Lage der Farben auf dem Kreis ist gerade so festgelegt worden, dass Komplementärfarben einander gegenüberliegen.

Wir machen nun noch kompliziertere Lichtmischungen: Wir verwenden drei Projektoren und orientieren sie so, dass es drei Überlappungsgebiete zwischen je zwei Farben gibt, und ein Gebiet, in dem sich alle drei Quadrate überlappen, Abb. 23.12.

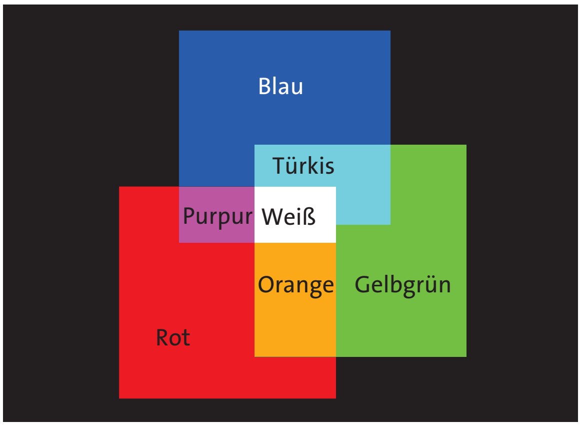


Abb. 23.12 Hier gibt es drei Überlappungsgebiete von je zwei Farben und ein Überlappungsgebiet von drei Farben.

Wir versuchen, durch Mischen von drei Farben Weiß zu erhalten. Vielleicht ahnst du schon, wie man es anstellen muss. Die drei Einzelfarben müssen auf dem Farbenkreis die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bilden, Abb. 23.13. So ergibt sich zum Beispiel:

- Rot + Gelbgrün + Blau = Weiß
- Purpur + Türkis + Orange = Weiß.

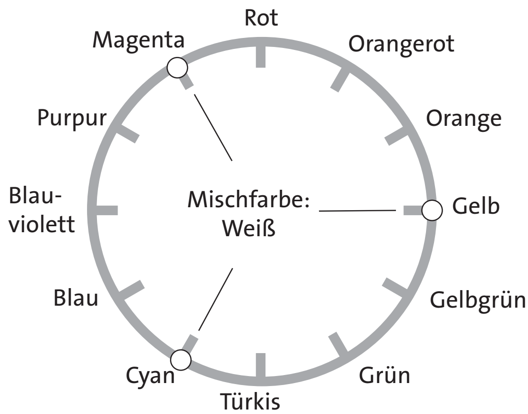


Abb. 23.13 Drei Farben, die auf dem Farbenkreis ein gleichseitiges Dreieck bilden, ergeben als Mischfarbe Weiß.

Entsprechend kann man mit 4 Projektoren aus 4 Farben Weiß erzeugen, wenn die 4 Farben die Ecken eines Quadrats bilden (ein Rechteck tut es übrigens auch). Und man könnte noch mehr Projektoren einsetzen. Immer wenn die Einzelfarben auf dem Farbenkreis ein gleichseitiges Vieleck bilden, entsteht als Mischfarbe Weiß. Im Prinzip entsteht so auch das Weiß des Lichts der Sonne, einer Glühlampe oder einer Leuchtstoffröhre. Alle diese Lichtquellen senden ein Gemisch aus vielen Lichtsorten aus, deren Farben außen auf dem Farbenkreis liegen.

23.3 Wie man das Auge täuschen kann – das Fernsehbild

Wir haben Licht gemischt, z. B. zwei Lichtsorten, die einzeln die Farbeindrücke Grün und Blau hervorrufen — und das ging so: von ein und demselben Ort des Schirms ging zur gleichen Zeit grünes und blaues Licht aus. Der resultierende Farbeindruck war Türkis.

Man kann nun das Mischen des grünen und blauen Lichts auch weniger sorgfältig machen, und trotzdem noch den Farbeindruck Türkis erhalten. Man kann das Auge sozusagen täuschen. Und das auf zweierlei Art.

Die Lichtbestandteile kommen nicht zur gleichen Zeit.

Auf einer kreisförmigen Scheibe befinden sich farbige Sektoren. Die Scheibe wird in einem dunklen Raum mit einem kräftigen weißen Lichtbündel beleuchtet und in schnelle Drehung versetzt, Abb. 23.14. Was man sieht, sind nicht mehr die Einzelfarben. Die ganze Scheibe erscheint in einer einheitlichen Farbe, nämlich der Mischfarbe. Also: Wenn wir einen roten und einen gelben Sektor haben, sieht man Orange; wenn wir drei Sektoren haben, und zwar einen roten, einen gelbgrünen und einen blauen, so sieht man Weiß. Genauer: ein dunkles Weiß, d. h. Grau.

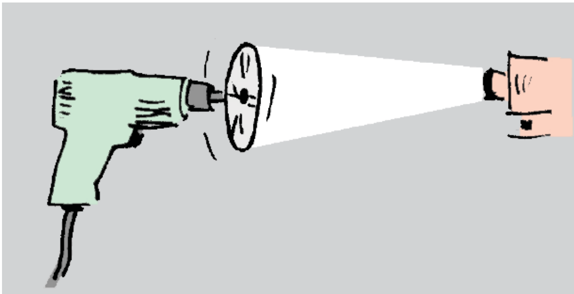


Abb. 23.14 Wenn sich die Scheibe sehr schnell dreht, sieht man die Mischfarbe aus den Farben der Sektoren.

Die Lichtbestandteile kommen nicht vom selben Ort.

Das grüne und das blaue Licht müssen auch nicht von genau derselben Stelle kommen. Das heißt auch, die beiden Lichtsorten müssen nicht genau auf dieselbe Stelle der Netzhaut fallen. Es reicht, dass die Stellen, von denen das grüne Licht kommt, so nah bei denen liegen, von denen das blaue kommt, dass sie das Auge nicht mehr „auflösen“ kann.

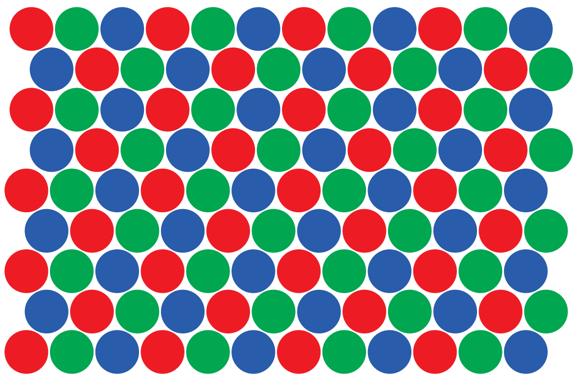


Abb. 23.15 Ausschnitt aus einem Fernsehbildschirm. Es gibt drei Sorten von Pixeln.

Man macht sich diese Möglichkeit oft zu Nutze. Der Fernseh- und der Computerbildschirm bestehen aus einem Raster von kleinen Flecken, den Pixeln. Von diesen gibt es drei Sorten. Die einen können rot, die zweiten gelbgrün und die dritten blau leuchten, Abb. 23.15. Schau dir einen Fernsehbildschirm ganz aus der Nähe mit einer Lupe an.

Wenn alle drei Pixelsorten leuchten, sieht man in größerer Entfernung nicht mehr die roten, gelbgrünen und blauen Pixel einzeln, sondern einheitlich Weiß. Leuchten nur die roten und die gelbgrünen, so sieht man gelb etc.

Man kann mithilfe der drei Pixelsorten jeden Farbeindruck erzeugen. Die Pixel werden dazu nicht nur ein- oder ausgeschaltet: Jedes Pixel kann einzeln hell oder dunkel gestellt werden. Wir betrachten einige Beispiele.

Die roten und die blauen Pixel seien völlig dunkel. Der Bildschirm ist dann einfach gelbgrün. Lässt man nun die Helligkeit der roten Pixel langsam ansteigen, so wird der Bildschirm an der entsprechenden Stelle langsam und stetig gelb, und dann, wenn die roten Pixel mit maximaler Helligkeit leuchten, etwas orange. Dreht man nun die Helligkeit der gelbgrünen Pixel langsam herunter, so ändert sich die Farbe des Bildschirms weiter in Richtung Rot, bis er schließlich, wenn die gelbgrünen Pixel ganz ausgeschaltet sind, ganz rot ist.

Auf entsprechende Art kommt man von Rot über Purpur zu Blau und von Blau über Türkis wieder zurück zu Gelbgrün.

Die blassen Farben erhält man, wenn nicht nur zwei Pixelsorten leuchten, sondern noch Licht von der dritten Sorte hinzugenommen wird. Leuchten alle drei Pixelsorten mit maximaler Helligkeit, so erhält man Weiß.

Aufgaben

1. Wie muss die Helligkeit der drei Pixelsorten des Fernsehbildschirms eingestellt werden, damit die folgenden Farben entstehen? Gelb, Violett, Pink, Oliv, Ocker, Dunkelgrau.
2. Wir hatten gesagt, mithilfe der drei Pixelsorten des Fernsehbildschirms könne man alle Farbeindrücke erzeugen. Diese Behauptung ist nicht ganz richtig. Warum nicht?

23.4 Noch einmal der Farbraum

Und noch einmal ein Umweg. Wir wollen wieder jemandem die Lage unseres Dorfes mitteilen. Du erinnerst dich: Es genügt dazu, die geographische Länge und die geographische Breite, d. h. zwei Zahlen anzugeben. Wir nehmen nun an, das ganze Land sei mit einem System von Straßen durchzogen, die ein quadratisches Gitter bilden. Die Straßen verlaufen aber nicht in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung, sondern diagonal: die einen von Südwest nach Nordost und die anderen von Südost nach Nordwest, Abb. 23.16. Die Straßen bilden also ein rechtwinkliges Koordinatensystem. Der Nullpunkt liegt in der Landeshauptstadt.

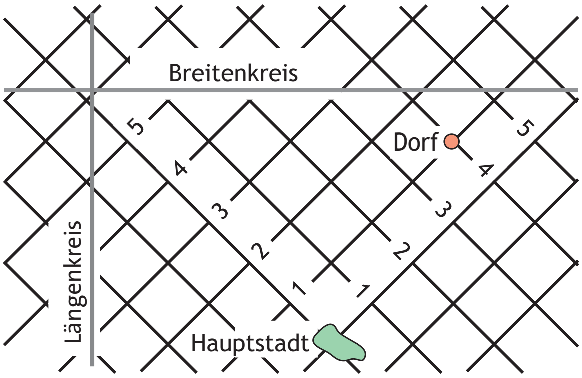


Abb. 23.16 Die Straßen bilden ein Koordinatensystem, das gegen die Längen- und Breitenkreislinien um 45° gedreht ist.

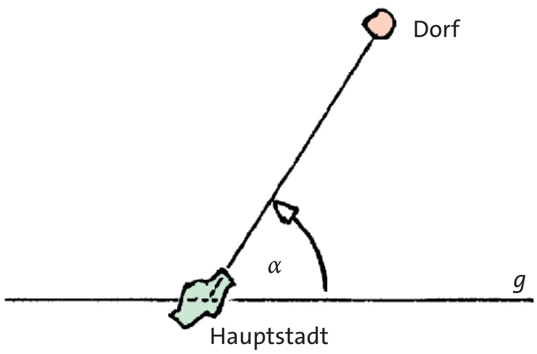


Abb. 23.17 Um den Ort des Dorfes festzulegen, gibt man den Abstand von der Hauptstadt an, sowie den Winkel gegen g.

Wir können nun die Lage unseres Dorfes auf eine andere Art angeben als vorher. Wieder müssen wir aber zwei Zahlenangaben machen: Die Nordost-Koordinate und die Nordwest-Koordinate. Wir ziehen daraus einen wichtigen Schluss: Egal, was für ein Koordinatensystem man benutzt, man muss zwei Zahlenangaben machen. Abb. 23.17 zeigt noch eine dritte Möglichkeit. Hier muss man die Entfernung r vom Ursprung und den Winkel α gegen die Gerade g angeben, um die Lage des Dorfes zu beschreiben; also wieder zwei Zahlen.

Bei den Farben sind wir in einer ähnlichen Lage, nur sind es hier drei Angaben, die man machen muss. Genau genommen handelt es sich auch hier um drei Zahlen-Angaben. Wir haben uns allerdings um die Eichung der Farbskalen nicht gekümmert und geben daher die Lage eines Farbeindrucks auf den drei Skalen nur näherungsweise an.

Genauso wie bei unserem Dorf kann man auch das Koordinatensystem der Farbeindrücke unterschiedlich wählen. Und wie man es auch wählt, immer muss man drei Angaben machen, um einen Farbeindruck zu beschreiben.

Wir haben schon zwei Beispiele für unterschiedliche Farb-Koordinatensysteme kennen gelernt:

- Farbton — Sättigung — Helligkeit;
- Helligkeit von Rot — Helligkeit von Gelbgrün — Helligkeit von Blau.

Im zweiten Fall sagt man auch, man verwende zur Beschreibung eines Farbeindrucks drei Grundfarben, nämlich Rot, Gelbgrün und Blau.

Sicher kannst du dir denken, wie weitere Farb-Koordinatensysteme aussehen könnten. Man nimmt als Grundfarben drei andere Farben, die auf dem Farbenkreis ein gleichseitiges Dreieck bilden, also zum Beispiel:

- Orange — Türkis — Purpur.

Auf den Koordinatenachsen ist also die Helligkeit dieser drei Farben aufgetragen.

Man hätte die Fernsehbildschirme so einrichten können, dass die drei Pixelsorten diese Farben haben. Man müsste dann zum Bildschirm statt der Rot — Gelbgrün — Blau-Koordinaten die Orange — Türkis — Purpur-Koordinaten übertragen.

Aufgabe

1. Nimm an, ein Fernsehbildschirm arbeite mit den Pixelfarben Orange — Türkis — Purpur (statt mit Rot — Gelb-Grün — Blau). Wie muss die Helligkeit der drei Pixelsorten eingestellt sein, damit die folgenden Farbeindrücke entstehen: Rot, Blau, Rosa, Weiß, Braun, Schwarz?

23.5 Spektren

Wir diskutieren in diesem Abschnitt nicht den Farbeindruck, den Licht über unsere Augen erzeugt, sondern wir beschäftigen uns mit der Zusammensetzung des Lichts selbst.

Licht besteht im Allgemeinen aus mehreren oder vielen Lichtsorten, sichtbaren und unsichtbaren.

Und uns geht es jetzt um die Zusammensetzung des Lichts. Dabei spielt es zunächst gar keine Rolle, dass wir mithilfe des Lichts sehen und dass wir Farben wahrnehmen können.

Das erste Problem: Wir möchten die Zusammensetzung eines bestimmten Lichtgemischs beschreiben. Vielleicht denkst du: Das können wir doch schon. Wir wissen doch, dass man dazu drei Angaben machen muss. Nicht richtig! Mit drei Angaben kann man den Farbeindruck in unseren Augen beschreiben, aber nicht das Lichtgemisch. Denn viele verschiedene Lichtgemische können denselben Farbeindruck erzeugen.

Um zu sehen, wie man ein Lichtgemisch eindeutig charakterisiert, diskutieren wir zunächst ein anderes, aber verwandtes Problem.

Wir wollen die Altersstruktur der Bevölkerung einer Stadt graphisch darstellen. Abb. 23.18a zeigt eine Möglichkeit. Die Menschen wurden eingeteilt in Altersgruppen: von 0 bis 20 Jahren, von 20 bis 40 Jahren usw. Jeder Mensch fällt in eine dieser Gruppen.

Du siehst aber gleich, dass diese Auftragung nicht sehr genau ist. Man kann ja nicht einmal die Babys von den Abiturienten unterscheiden. Dem kann aber abgeholfen werden: Man wählt eine feinere Einteilung, Abb. 23.18b. Und wem das noch nicht genügt, der kann die Einteilung noch feiner machen. Schließlich werden die Schritte so klein, dass man die Bevölkerungszahl pro Alters-

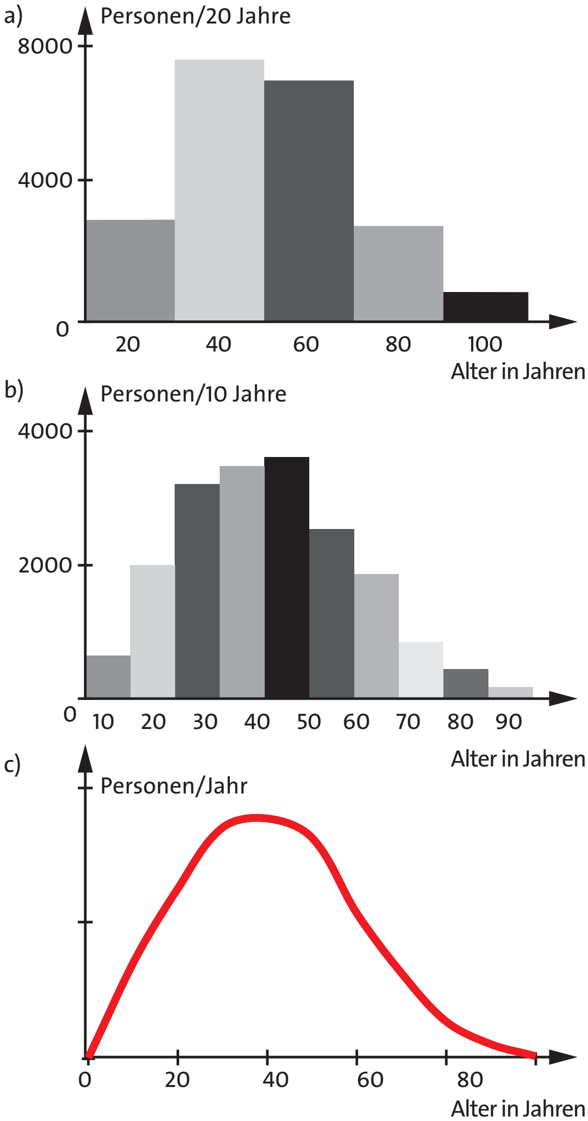


Abb. 23.18 Graphische Darstellungen der Altersstruktur einer Stadt. (a) Zwanzigjahresintervalle; (b) Zehnjahresintervalle; (c) stetige Darstellung

gruppe durch eine glatte Linie darstellen kann, Abb. 23.18c. Wir nennen eine solche Kurve ein Altersspektrum.

Unser Problem beim Licht ist ganz ähnlich. Wir erinnern uns zunächst noch einmal daran, dass sich Licht immer bewegt. Wir haben es beim Licht immer mit einem Strom zu tun.

Jedes Licht setzt sich nun zusammen aus Beiträgen von Licht unterschiedlicher Wellenlängen. (Zur Erinnerung: „Sichtbares" Licht hat Wellenlängen zwischen 400 nm und 800 nm.)

Um die Zusammensetzung eines bestimmten Gemischs darzustellen, teilen wir die Wellenlängenachse in Bereiche ein, z. B. in Bereiche von 20 nm. Der Balken über jedem Bereich gibt an, wie viel Licht das Gemisch aus diesem Bereich enthält, Abb. 23.19a. Als Maß für den Lichtstrom nehmen wir die Energiestromstärke, die Zahl der Joules, die das Licht des betrachteten Wellenlängenbereichs pro Sekunde transportiert.

Wieder könnte es sein, dass uns die Auftragung zu grob ist. Wir verfeinern sie so weit, bis wir eine kontinuierliche Kurve erhalten: ein Spektrum, Abb. 23.19b.

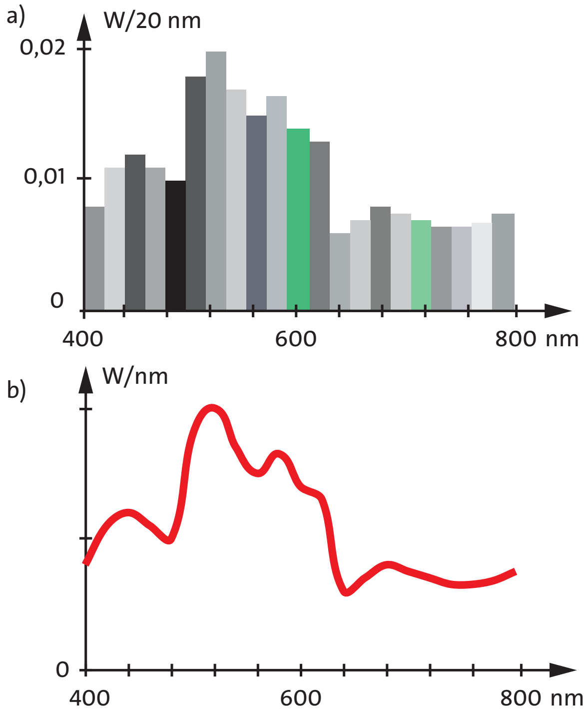


Abb. 23.19 Graphische Darstellungen der Zusammensetzung eines Lichtgemischs. (a) 20-nm-Intervalle; (b) stetige Darstellung

Geräte, mit denen man Spektren aufnehmen kann, heißen Spektrometer.

In vielen Spektrometern wird die Lichtzerlegung mithilfe eines Prismas erreicht.

Wie das Spektrum eines bestimmten Lichtgemischs aussieht, erkennt man grob, wenn man das Licht mit einem Prisma zerlegt und die in verschiedene Richtungen abgeknickten Lichtstrahlen auf einem Schirm auffängt. Wir schauen uns die Spektren verschiedener Lichtquellen an. Abb. 23.20a zeigt das Spektrum des Sonnenlichts, Abb. 23.20b das einer Glühlampe und das von Abb. 23.20c gehört zu einer sogenannten Natriumdampflampe.

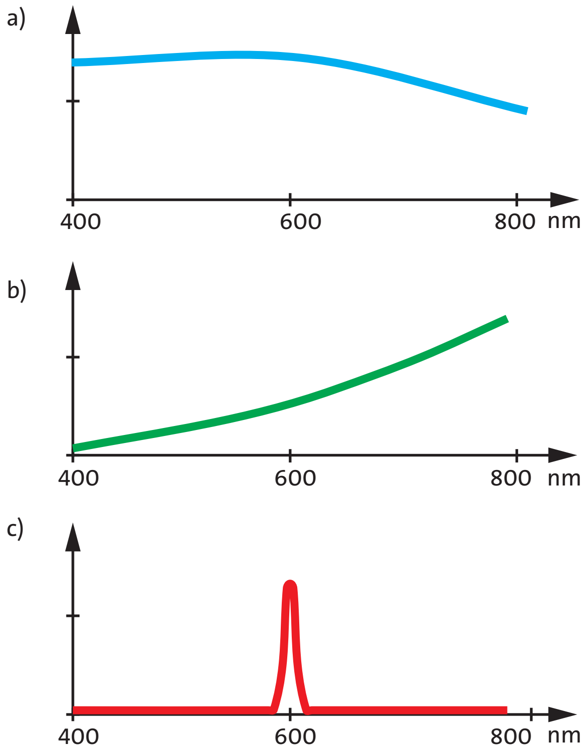


Abb. 23.20 Spektren. (a) Sonnenlicht; (b) Glühlampenlicht; (c) Natriumdampflampe

Sonnen- und Glühlampenspektrum enthalten Licht aller Wellenlängen. Die Natriumdampflampe enthält praktisch nur Licht einer einzigen Wellenlänge: monochromatisches Licht. Lampen, die nur Licht einer einzigen Wellenlänge oder einiger weniger Wellenlängen abgeben, gibt es noch viele andere. Man nennt sie Spektrallampen.

23.6 Der Zusammenhang zwischen Spektrum und Farbeindruck

Wir betrachten noch einmal die Farbscheibe, d. h. die Oberseite des Farbzylinders: Alle Farben haben eine große Helligkeit. Am äußeren Rand liegen die gesättigten Farben. Zur Mitte hin werden sie immer weniger gesättigt. Ganz in der Mitte liegt das Weiß. Welche Spektren gehören nun zu den verschiedenen Farbeindrücken der Farbscheibe?

Monochromatisches Licht erzeugt immer einen Farbeindruck maximaler Sättigung.

Die Umkehrung, nämlich, dass die gesättigten Farbeindrücke durch monochromatisches Licht hervorgerufen werden, gilt allerdings nicht immer. Sie gilt nur für die Farben, die in Abb. 23.21 durch eine gestrichelte Linie markiert sind.

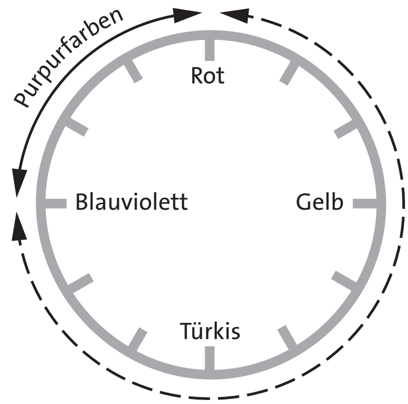


Abb. 23.21 Nur zu den Farben im gestrichelt markierten Bereich des Farbenkreises gehört eine einzige Lichtsorte.

Jede Farbe, die nicht auf dem Rand der Farbscheibe liegt, lässt sich durch mehr als nur ein Spektrum erzeugen. Je ungesättigter die Farbe ist, desto mehr Möglichkeiten gibt es. Für Weiß hattest du das schon gesehen. Weiß erhält man zum Beispiel durch Mischen der zwei Lichtsorten, die zu gegenüber liegenden Punkten des Farbenkreises gehören.

Wir sehen also: Mit Ausnahme der Farben auf dem Rand der Farbscheibe gehören zu jeder Farbe viele verschiedene Spektren.

Unsere Augen nehmen also von der ganzen Kompliziertheit eines Spektrums nur sehr wenig wahr. Dies ist ein Beispiel für Datenreduktion. Mit dem Spektrum kommen sehr viele Daten in unsere Augen. Weitergeleitet zum Gehirn werden aber viel weniger. Statt des ganzen Spektrums werden sozusagen nur drei Zahlen weitergegeben. (Vergiss nicht, dass wir hier nur von einem einzigen Bildpunkt, d. h. einer einzigen Stelle der Netzhaut sprechen.)

Der Zusammenhang zwischen Spektrum und Farbeindruck

Wir sind bisher einem Problem ausgewichen. Den gesättigten Farben, die zwischen Rot und Violett liegen – Purpur, Magenta …– entspricht kein monochromatisches Licht. Man nennt diese Farben die Purpurfarben. Oberhalb von Rot auf der Wellenlängenskala wird ja das Licht nicht purpur, sondern infrarot, also unsichtbar. Und unterhalb von violett wird es auch nicht purpur, sondern ultraviolett, also auch unsichtbar.

Um Farbeindrücke der gesättigten Purpurfarben zu erzeugen, muss man zwei reine Lichtsorten miteinander mischen: rotes und violettes Licht. Je nach dem Anteil der beiden Lichtsorten liegt der Farbeindruck näher beim Violett oder näher beim Rot.

Aufgaben

1. Skizziere zwei verschiedene Spektren, die zum Farbeindruck Blassgelb gehören.
2. Skizziere drei verschiedene Spektren, die zum Farbeindruck Weiß gehören.

24 STOFFUMSATZ UND CHEMISCHES POTENZIAL

Zunächst eine Definition der Chemie: Die Chemie befasst sich mit Stoffumwandlungen. Sie beschreibt zum Beispiel die Reaktion von Benzin und Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser, d. h. die Verbrennung von Benzin:

Benzin, Sauerstoff → Kohlenstoffdioxid, Wasser

Diese Definition der Chemie ist noch etwas provisorisch, denn zum einen beschäftigen sich Chemiker und Chemikerinnen nicht ausschließlich mit Umwandlungen von Stoffen; und zum anderen gibt es Stoffumwandlungen, die man nicht zur Chemie zählt, sondern zur Kernphysik. Aber für den Anfang mag die hier gegebene Definition reichen.

Die Chemie ist mit dem Fachgebiet Physik eng verwandt. Es wäre eigentlich vernünftig, Chemie und Physik als ein gemeinsames Gebiet der Naturwissenschaft aufzufassen. Dass man Chemie und Physik trennt, dass es zwei verschiedene Schulfächer und zwei verschiedene Studienfächer an der Universität gibt, dass Physiker ein anderer Beruf ist als Chemiker, hat eher praktische Gründe: Ein gemeinsames Fach Physik-Chemie wäre einfach zu umfangreich, eine einzelne Person könnte es nicht beherrschen.

Viele der Arbeitsmethoden von Physikern und Chemikern sind sehr ähnlich. Und man kann in der Chemie auch mit denselben theoretischen Werkzeugen arbeiten wie in der Physik: Man kann chemische Reaktionen mithilfe physikalischer Größen und den Zusammenhängen zwischen diesen Größen beschreiben. Den Teil der Chemie, der sich besonders stark an der Physik orientiert, nennt man auch physikalische Chemie.

Einige der Größen, die in der physikalischen Chemie gebraucht werden, sind dir schon aus der Physik bekannt: die Temperatur, der Druck und die Entropie. Es gibt aber einige Größen, die neu hinzukommen.

Wir hatten in der Wärmelehre eine Größe eingeführt, um Wärmemenge zu messen: die Entropie *S*, Tab. 24.1. In der Elektrizitätslehre hat man es zu tun mit einer Größe, die die Menge von Elektrizität misst: die elektrische Ladung oder Elektrizität *Q*. In der Mechanik gibt es eine Größe, die die Menge an Bewegung oder den Schwung eines Körpers misst: der Impuls *p*.

Mechanik	p = Impuls (Bewegungsmenge)
Elektrizitätslehre	Q = elektrische Ladung (Elektrizitätsmenge)
Wärmelehre	S = Entropie (Wärmemenge)
Chemie	n = Stoffmenge

Tab. 24.1 Übersicht über einige Größen aus Physik und Chemie

Genauso werden wir nun in der Chemie eine Größe brauchen, mit der wir die Menge einer Substanz messen können. Sie heißt die Stoffmenge und wird abgekürzt *n*.

Wir hatten es in jedem der gerade erwähnten Teilgebiete der Physik noch mit einer anderen charakteristischen Größe zu tun, mit einer Größe, deren Werte uns angeben, von wo nach wo die entsprechende Menge fließt.

So sagen uns die Temperaturwerte, in welche Richtung die Entropie fließt, nämlich von der hohen zur niedrigen Temperatur. Das elektrische Potenzial sagt uns, in welche Richtung die Elektrizität strömt, und an den Geschwindigkeiten von Körpern können wir erkennen, von welchem zu welchem Körper bei einem Reibungsvorgang der Impuls fließt.

Entsprechend werden wir eine „chemische" Größe kennen lernen, die uns anzeigt, in welche Richtung eine chemische Reaktion läuft. Diese Größe ist das chemische Potenzial, abgekürzt durch den griechischen Buchstaben μ. Das chemische Potenzial sagt uns zum Beispiel, ob die folgende Reaktion von selbst von links nach rechts oder von rechts nach links läuft:

$$\text{Wasserstoff, Stickstoff} \overset{?}{\longleftrightarrow} \text{Ammoniak}$$

d. h. ob aus Wasserstoff und Stickstoff Ammoniak entsteht, oder ob Ammoniak von selbst in Wasserstoff und Stickstoff zerfällt.

24.1 Stoffmenge und Stoffstromstärke

Wie der Name sagt, misst die Größe Stoffmenge die Menge eines Stoffs. Die Maßeinheit der Stoffmenge ist das Mol. Eine Stoffportion von 1 mol enthält $6{,}022 \cdot 10^{23}$ kleinste Teilchen.

Es ist nicht immer leicht zu entscheiden, welches die kleinsten Teilchen eines Stoffes sind.

Oft sind die kleinsten Teilchen Moleküle. So enthält 1 mol Wasserstoffgas $6{,}022 \cdot 10^{23}$ H_2-Moleküle. Bei manchen Stoffen sind die kleinsten Teilchen Atome, bei Heliumgas zum Beispiel. Ein mol Helium besteht aus $6{,}022 \cdot 10^{23}$ He-Atomen. Etwas komplizierter ist die Situation bei den meisten Feststoffen. So müsste man einen Kochsalzkristall eigentlich als ein einziges Riesenmolekül bezeichnen. Der Kristall bestünde also aus einem einzigen kleinsten Teilchen. Hier ist es aber üblich, als kleinstes Teilchen ein einziges Na-Ion zusammen mit einem einzigen Cl-Ion zu bezeichnen. Eine solche „NaCl-Formeleinheit" ist aber streng genommen gar kein Molekül. Wenn wir in Zukunft von 1 mol Kochsalz sprechen, meinen wir aber immer $6{,}022 \cdot 10^{23}$ solcher NaCl-Formeleinheiten.

Statt zu sagen, ein Stoff bestehe aus kleinsten Teilchen, kann man auch sagen, es gebe für ihn eine kleinste Menge, und diese Menge kann man in mol ausdrücken. Wir nennen die kleinstmögliche Stoffmenge die Elementarmenge. Es gilt:

$$6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen: } 1 \text{ mol}$$

$$1 \text{ Teilchen: } \frac{1}{6{,}022 \cdot 10^{23}} \text{ mol} = 1{,}66 \cdot 10^{-24} \text{ mol}$$

oder:

$$\text{Elementarmenge} = 1{,}66 \cdot 10^{-24} \text{ mol.}$$

Chemiker messen Substanzmengen in mol. Aber warum eigentlich? Warum machen sie es nicht wie andere, „vernünftige" Menschen auch und messen die Menge einer Stoffportion in Kilogramm oder in Liter? Weil die Chemie viel einfacher wird, wenn man Mengen in mol angibt. Die Chemie wird einfacher, wenn man die Stoffmenge benutzt, und nicht die Masse oder das Volumen.

Zur Erläuterung eine Diskussion zwischen einem Musiker, einem Physiker und einer Chemikerin:

In einem Reagenzglas befindet sich pulverförmiges Eisen, in einem anderen Schwefel.

- Musiker: Was soll das sein, Eisen und Schwefel?
- Physiker: Ja, das sieht man doch.
- Musiker: Aha. Es ist mehr Schwefel als Eisen, ungefähr doppelt so viel, das sieht man auch.
- Physiker: Unsinn, nehmen Sie es doch mal in die Hand, spüren Sie nicht, dass das Eisen viel schwerer ist? Hier, bitte schön, die Waage zeigt es an: 14 g Eisen, aber nur 8 g Schwefel.
- Chemikerin: Wie bitte? Das sehe ich aber ganz anders. Schauen Sie mal her. (Sie vermischt die beiden Stoffe und erhitzt das Gemisch mit einem Bunsenbrenner. Am Aufglühen des Gemischs erkennt man, dass eine Reaktion abläuft.) Bei der Reaktion ist weder Eisen noch Schwefel übrig geblieben. Das ist der Beweis dafür, dass es genauso viel Eisen wie Schwefel war. Es waren übrigens gerade je 1/4 mol.

Du erkennst an dem Gespräch, dass die Einstufung als „mehr" oder „weniger" davon abhängt, welches Mengenmaß man zugrunde legt.

Um die Auseinandersetzung zwischen den drei Personen besser zu durchschauen, betrachten wir die Reaktionsgleichung der Reaktion, die die Chemikerin in Gang gesetzt hat:

$$Fe + S \rightarrow FeS.$$

Diese Gleichung macht eine sehr einfache Aussage über die Bilanz der Reaktion, vorausgesetzt man misst die Mengen der Stoffe in mol. Die Gleichung sagt nämlich, dass die Stoffmenge des reagierenden Eisens genauso groß ist wie des Schwefels, und dass die Stoffmenge des entstehenden Eisensulfids dieselbe ist wie die des verschwindenden Eisens (und damit auch wie die des verschwindenden Schwefels).

Geht man von 1 mol Eisen aus, so ist:

$$1 \text{ mol Fe} + 1 \text{ mol S} \rightarrow 1 \text{ mol FeS}.$$

Misst man die Mengen der Stoffportionen dagegen in kg, d. h. misst man die Massen, so erscheint die Bilanz komplizierter. Wir lassen z. B. 1 kg Eisen reagieren. Dabei werden 0,5741 kg Schwefel verbraucht und es entstehen 1,5741 kg Eisensulfid:

$$1 \text{ kg Fe} + 0{,}5741 \text{ kg S} \rightarrow 1{,}5741 \text{ kg FeS}.$$

Die Massenwerte des Schwefels und des Eisensulfids sind also „krumme Zahlen".

Wir wollen an noch einem anderen Beispiel klar machen, was eine Reaktionsgleichung aussagt. Wir betrachten die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff, bei der Wasser entsteht. Du weißt aus dem Chemieunterricht, wie die entsprechende Reaktionsgleichung lautet:

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O. \qquad (24.1)$$

Die Gleichung sagt uns, in welchem Mengenverhältnis die an der Reaktion beteiligten Stoffe stehen, vorausgesetzt man misst die Mengen in mol (und nicht etwa in kg). Es ist nämlich:

$$n(H_2) : n(O_2) : n(H_2O) = 2 : 1 : 2.$$

Gleichung (24.1) sagt uns nur etwas über das Verhältnis zwischen den Größen $n(H_2)$, $n(O_2)$, und $n(H_2O)$ zueinander. Die Gleichung braucht also nicht unbedingt zu bedeuten:

$$2 \text{ mol } H_2 + 1 \text{ mol } O_2 \rightarrow 2 \text{ mol } H_2O.$$

Sie kann auch bedeuten

$$3 \text{ mol } H_2 + 1{,}5 \text{ mol } O_2 \rightarrow 3 \text{ mol } H_2O$$

oder

$$520 \text{ mol } H_2 + 260 \text{ mol } O_2 \rightarrow 520 \text{ mol } H_2O.$$

Da man mit einer Reaktionsgleichung nur die Verhältnisse der Stoffmengen zum Ausdruck bringen will, kann man jede solche Gleichung auch in beliebig vielen anderen Formen schreiben. So kann man statt Gleichung (24.1) auch schreiben

$$4\,H_2 + 2\,O_2 \rightarrow 4\,H_2O, \qquad (24.2)$$

$$10\,H_2 + 5\,O_2 \rightarrow 10\,H_2O. \qquad (24.3)$$

Alle drei Gleichungen (24.1), (24.2) und (24.3) machen dieselbe Aussage. Im Allgemeinen schreibt man aber eine Reaktionsgleichung so, dass vor den Stoffsymbolen die kleinstmöglichen ganzen Zahlen stehen.

In unserem Fall ist das die Schreibweise von Gleichung (24.1). Wir nennen diese Form der Gleichung Normalform.

Wir werden im Folgenden als Mengenmaß für einen Stoff die Größe n, d. h. die Stoffmenge benutzen. Wir haben nun allerdings zur Bestimmung von Stoffmengenwerten nicht ein so einfaches Messgerät wie zur Bestimmung von Massenwerten. (Massen bestimmt man mit der Waage.) Um einen Stoffmengenwert zu bestimmen, muss man einen Umweg machen: Im Periodensystem (Tab. 33.3 im Anhang) ist die Masse eines Mols jedes chemischen Grundstoffs aufgeführt. Die rechte der beiden Zahlen unter dem Elementsymbol bedeutet die Masse pro Stoffmenge, nämlich den Quotienten m/n. Es ist zu beachten, dass dieser Wert nicht in kg/mol angegeben wird, sondern in g/mol. So steht zum Beispiel beim Kupfer:

$${}_{29}\mathrm{Cu}_{63{,}5}$$

Für Kupfer ist daher

$$m/n = 63{,}5\ \text{g/mol}.$$

Das bedeutet, 1 mol Kupfer wiegt 63,5 g, oder in anderen Worten: Eine Stoffportion Kupfer, deren Stoffmenge 1 mol beträgt, hat eine Masse von 63,5 g.

Um die Masse eines Mols einer chemischen Verbindung zu bestimmen, zählt man die m/n-Werte der Grundstoffe, aus denen die Verbindung besteht, zusammen. Wenn in einem Molekül eine Atomsorte zweimal, dreimal etc. vorkommt, muss man die entsprechenden m/n-Werte zweimal, dreimal etc. zählen.

Beispiel

Welche Masse hat 1 mol Fe_2O_3?

Im Periodensystem steht bei Eisen

$$^{55,8}_{26}\text{Fe}$$

und bei Sauerstoff

$$^{16,0}_{8}\text{O}$$

Die Masse von 1 mol Fe_2O_3 ist daher

$$m = 2 \cdot 55{,}8\ \text{g} + 3 \cdot 16{,}0\ \text{g} = 159{,}6\ \text{g}.$$

Oft läuft eine chemische Reaktion kontinuierlich ab, z. B. die Verbrennungsreaktion in der Flamme einer Kerze oder im Brenner der Ölzentralheizung. Auch die meisten Reaktionen in der chemischen Industrie laufen kontinuierlich ab. Um jemandem mitzuteilen, wie viel bei einer solchen Reaktion von einem Stoff entsteht, kann man nicht einen Stoffmengenwert angeben, denn die Stoffmenge der Reaktionsprodukte nimmt ja unaufhörlich zu. Ein vernünftiges Maß ist hier die Stoffmenge pro Zeit, die Zahl der mol, die pro Sekunde entstehen, oder die Zahl der mol, die pro Sekunde aus dem Reaktionsraum herausströmen.

Wir nennen diese Größe die Stoffstromstärke I_n. Es ist also

$$I_n = \frac{n}{t}.$$

Die Maßeinheit der Stoffstromstärke ist mol/s.

Aufgaben

1. Welche Masse hat 1 mol der folgenden Stoffe?
   H_2O (Wasser)
   O_2 (Sauerstoff)
   CO_2 (Kohlenstoffdioxid)
   Ag_2S (Silbersulfid)
   $Pb(NO_3)_2$ (Bleinitrat)
   $C_{12}H_{22}O_{11}$ (Rohrzucker)
2. Wie viel mol Zucker enthalten 100 g Bonbons? (Bonbons bestehen zu praktisch 100 % aus Rohrzucker.)
3. Wie groß ist die Stoffmenge von 1 l Wasser?
4. Eine Gasflasche enthält 12 kg Propan (C_3H_8). Wie viel mol sind das?

24.2 Umsatz und Umsatzrate

Wir lassen die Reaktion

$$C + O_2 \rightarrow CO_2,$$

d. h. die Verbrennung von Kohlenstoff, zweimal nacheinander ablaufen. Beim ersten Mal wird ein mol Kohlenstoff verbrannt. Wir haben also

$$1\ \text{mol C} + 1\ \text{mol } O_2 \rightarrow 1\ \text{mol } CO_2.$$

Beim zweiten Mal verbrennen wir 5 mol Kohlenstoff, es ist also

$$5\ \text{mol C} + 5\ \text{mol } O_2 \rightarrow 5\ \text{mol } CO_2.$$

Beim zweiten Mal sind größere Stoffmengen umgesetzt worden. Wir sagen, der Umsatz der Reaktion ist beim zweiten Reaktionsablauf fünfmal so groß wie beim ersten.

Wir wollen nun zwei ganz verschiedene Reaktionen miteinander vergleichen: die Verbrennung von Aluminium

$$4\ Al + 3\ O_2 \rightarrow 2\ Al_2O_3 \qquad (24.4)$$

mit der Bildung von Ethin und Calciumhydroxid aus Calciumcarbid und Wasser

$$CaC_2 + 2\ H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2. \qquad (24.5)$$

Nehmen wir an, im ersten Fall werden 8 mol Aluminium oxidiert, d. h. es gilt

$$8 \text{ mol Al} + 6 \text{ mol } O_2 \rightarrow 4 \text{ mol } Al_2O_3. \qquad (24.6)$$

und im zweiten werden 3 mol Ethin erzeugt, also

$$3 \text{ mol } CaC_2 + 6 \text{ mol } H_2O \rightarrow 3 \text{ mol } Ca(OH)_2 + 3 \text{ mol } C_2H_2. \qquad (24.7)$$

In welcher Reaktion wurde mehr umgesetzt? Vergleicht man die Ausgangsstoffe, so wird der Umsatz der ersten Reaktion größer: In ihr reagieren insgesamt 14 mol. Die Menge der Ausgangsstoffe der zweiten Reaktion ist nur 9 mol. Nimmt man dagegen die Endstoffe als Maß für den Umsatz, so gewinnt die zweite Reaktion. In der zweiten Reaktion entstehen 6 mol, in der ersten nur 4.

Es wäre sicher besser, wenn wir ein eindeutiges Maß für den Umsatz hätten.

Wir betrachten die Reaktion von Gleichung (24.6). Unter die Reaktionsgleichung, die den Umsatz der einzelnen Stoffe in mol beschreibt, schreiben wir die Normalform der Gleichung, also:

$$\begin{array}{llll} 8 \text{ mol Al} & + 6 \text{ mol } O_2 & \rightarrow 4 \text{ mol } Al_2O_3 \\ 4 \text{ Al} & + 3 \text{ } O_2 & \rightarrow 2 \text{ } Al_2O_3. \end{array}$$

Wir wählen einen beliebigen der in der Reaktionsgleichung auftretenden Stoffe aus, z. B. das Aluminium. Wir dividieren nun die umgesetzte Menge des Aluminiums durch die Zahl, die in der Normalform vor dem Al steht:

$$\frac{8 \text{ mol}}{4} = 2 \text{ mol}.$$

Tut man dasselbe für einen anderen an der Reaktion beteiligten Stoff, so erhält man dasselbe Ergebnis. Für den Sauerstoff erhalten wir:

$$\frac{6 \text{ mol}}{3} = 2 \text{ mol}$$

und für das Aluminiumoxid

$$\frac{4 \text{ mol}}{2} = 2 \text{ mol}.$$

Dieses Ergebnis, das wir auf drei verschiedene Arten erhalten haben, nennen wir den Umsatz der Reaktion, als Symbol $n(R)$. Es ist also:

$$n(R) = \frac{\text{umgesetzte Menge von X}}{\text{Zahl vor X in Normalform}}.$$

Hier steht X für einen beliebigen an der Reaktion beteiligten Stoff. Wir wenden die Methode noch auf Reaktionsgleichung (24.7) an:

$$\begin{array}{llll} 3 \text{ mol } CaC_2 & + 6 \text{ mol } H_2O & \rightarrow 3 \text{ mol } Ca(OH)_2 & + 3 \text{ mol } C_2H_2 \\ CaC_2 & + 2 \text{ } H_2O & \rightarrow Ca(OH)_2 & + C_2H_2. \end{array}$$

Wir wählen als beliebigen Stoff das H_2O aus. Es ergibt sich

$$n(R) = 6 \text{ mol}/2 = 3 \text{ mol}.$$

Wieder erhält man dasselbe Ergebnis bei Verwendung der anderen Stoffe.

Wir wollen nun zwei ständig ablaufende Reaktionen miteinander vergleichen. Es ist jetzt nicht mehr möglich, den Umsatz der Reaktionen zu betrachten, denn der nimmt ja unaufhörlich zu. Was man vergleichen muss, ist der Umsatz pro Zeit, die Umsatzrate $I_{n(\mathrm{R})}$

$$I_{n(\mathrm{R})} = \frac{n(\mathrm{R})}{t}.$$

Als Maßeinheit ergibt sich mol/s.

Wir nehmen an, die Reaktion

$$2 \text{ } H_2 + O_2 \rightarrow 2 \text{ } H_2O$$

laufe ab mit einer Umsatzrate von

$$I_n(R) = 0{,}02 \text{ mol/s}.$$

Wir multiplizieren die Gleichung in ihrer Normalform (sie hat bereits Normalform) mit 0,02 mol/s:

$$0{,}04 \text{ mol/s } H_2 + 0{,}02 \text{ mol/s } O_2 \rightarrow 0{,}04 \text{ mol/s } H_2O.$$

Bei einer Umsatzrate von 0,02 mol/s reagieren also in jeder Sekunde 0,04 mol Wasserstoff mit 0,02 mol Sauerstoff zu 0,04 mol Wasser.

Aufgaben

1. Vervollständige die folgende Reaktionsgleichung, und gib den Umsatz der Reaktion an: 8 mol Fe + $O_2 \rightarrow Fe_2O_3$
2. Kohlenstoffdioxid kann mit Magnesium zu Kohlenstoff und Magnesiumoxid reagieren:
$CO_2 + 2\ Mg \rightarrow C + 2\ MgO$
a) Es entstehen 4 g Kohlenstoff. Schreibe die Reaktionsgleichung mit den zugehörigen Stoffmengenangaben auf.
b) Wie viel Gramm Kohlenstoffdioxid und wie viel Gramm Magnesium reagieren miteinander?
c) Wie viel CO_2-Moleküle verschwinden?
d) Wie groß ist der Umsatz der Reaktion?
3. In einer Methanflamme entstehen pro Sekunde 0,1 mol Wasser. Wie groß ist die Umsatzrate?
4. In den Zylindern eines Automotors wird Benzin verbrannt. Zur Vereinfachung nehmen wir an, das Benzin bestehe aus reinem Oktan:
$2\ C_8H_{18} + 25\ O_2 \rightarrow 16\ CO_2 + 18\ H_2O$.
Wie groß ist die Umsatzrate, wenn beim Durchfahren einer Strecke von 100 km 10 l Wasser entstehen und das Auto mit 50 km/h gefahren wird?

24.3 Das chemische Potenzial

Die Stoffe A1, A2, A3, … sollen im Prinzip miteinander reagieren können zu B1, B2, B3, … Mit „im Prinzip reagieren können" ist gemeint, dass die Reaktion von der Reaktionsgleichung nicht verboten wird. (So ist die Reaktion $Cu + S \rightarrow CuS$ im Prinzip nicht verboten, bei der Reaktion $Cu + S \rightarrow Cu_2S$ dagegen stimmt die Kupferbilanz nicht.) Wir haben also

$$A1 + A2 + A3 + \ldots \rightarrow B1 + B2 + B3 + \ldots$$

Wir schreiben diese Reaktion noch einmal, abgekürzt:

$$A \rightarrow B\,. \tag{24.8}$$

Hier bedeutet A = A1 + A2 + A3 + … und B = B1 + B2 + B3 + …

Wenn nun die Reaktionsbilanz die Reaktion (24.8) nicht verbietet, so verbietet sie auch nicht die umgekehrte Reaktion:

$$B \rightarrow A. \tag{24.9}$$

Welche der beiden Reaktionen (24.8) und (24.9) läuft nun aber ab? Verwandelt sich die Stoffkombination A in die Stoffkombination B oder umgekehrt? In welche Richtung läuft die Reaktion

$$A \overset{?}{\longleftrightarrow} B$$

von links nach rechts oder von rechts nach links?

Über die Richtung einer Reaktion gibt uns eine neue physikalische Größe Auskunft: das chemische Potenzial μ. Für jede der beiden Stoffkombinationen hat μ einen bestimmten Wert. Ist das chemische Potenzial $\mu(A)$ der Stoffkombination A größer als das chemische Potenzial $\mu(B)$ der Stoffkombination B, so läuft die Reaktion nach rechts, von A nach B. Ist $\mu(A)$ kleiner als $\mu(B)$, so läuft die Reaktion von rechts nach links. Sind $\mu(A)$ und $\mu(B)$ gleich groß, so läuft die Reaktion weder nach rechts noch nach links, sie läuft gar nicht mehr. Sie befindet sich im Zustand des chemischen Gleichgewichts.

> $\mu(A) > \mu(B)$: A verschwindet, B entsteht;
> $\mu(A) < \mu(B)$: B verschwindet, A entsteht;
> $\mu(A) = \mu(B)$: keine Reaktion, chemisches Gleichgewicht

Etwas weniger genau, aber leichter zu merken, kann man auch sagen:

> Eine Reaktion läuft von selbst vom hohen zum niedrigen chemischen Potenzial.

Wir nennen die Differenz $\mu(A) - \mu(B)$ die chemische Spannung der Reaktion $A \rightarrow B$. Damit die Reaktion $A \rightarrow B$ ablaufen kann, muss die chemische Spannung größer als Null sein. Das kann man auch so ausdrücken:

> Die chemische Spannung stellt einen Antrieb für eine Reaktion dar.

Die Maßeinheit des chemischen Potenzials ist Gibbs, abgekürzt *G*, nach J. W. Gibbs, dem Erfinder des chemischen Potenzials.

Jeder Stoff hat ein bestimmtes chemisches Potenzial. Wir fragen zunächst nach dem chemischen Potenzial von Reinstoffen, also nicht von Stoffkombinationen. Die chemischen Potenziale der Reinstoffe findet man in Tabellen. Das chemische Potenzial ändert sich mit dem Druck und mit der Temperatur des Stoffes. Die Tabellen enthalten gewöhnlich das chemische Potenzial für Normalbedingungen, d.h. für einen Druck von 1 bar und eine Temperatur von 25 °C. Tab. 33.1 im Anhang enthält die Potenzialwerte für etwa 800 verschiedene Stoffe.

Die Messung des chemischen Potenzials eines Stoffes kann recht aufwendig sein. Wir werden später sehen, wie man dabei vorgeht. Zunächst entnehmen wir die Potenzialwerte einfach der Tabelle.

Wir suchen das chemische Potenzial von Ethanol. Dazu müssen wir unter der Summenformel C_2H_6O nachsehen. Wir finden:

$$\mu(C_2H_6O) = -174{,}89\ \text{kG}.$$

Die Einheit kG bedeutet Kilogibbs. Das chemische Potenzial von Wasser findet man unter OH_2:

$$\mu(OH_2) = -237{,}18\ \text{kG}.$$

Mit dem chemischen Potenzial der Reinstoffe allein kann man noch nicht viel anfangen. Unser Problem war ja, zu entscheiden, ob sich eine Kombination aus mehreren Stoffen in eine andere Kombination aus anderen Stoffen verwandelt. Was wir brauchen, ist also das chemische Potenzial einer Stoffkombination.

Das chemische Potenzial einer Stoffkombination

$$A = A1 + A2 + A3 + \ldots$$

lässt sich nun sehr leicht berechnen, wenn man die chemischen Potenziale der Reinstoffe A1, A2, A3… kennt. Es ist nämlich

$$\mu(A) = \mu(A1) + \mu(A2) + \mu(A3) + \ldots$$

Falls ein Stoff in einer Stoffkombination mit einem Vorfaktor auftritt, so wird dieser Vorfaktor in die Summe der chemischen Potenziale übernommen. Als Beispiel betrachten wir die Verbrennung von Methan (dem Hauptbestandteil des Erdgases):

$$\underbrace{CH_4 + 2\,O_2}_{A} \rightarrow \underbrace{CO_2 + 2\,H_2O}_{B} \qquad (24.10)$$

$$\begin{aligned}\mu(A) &= \mu(CH_4) + 2\,\mu(O_2)\\ &= -50{,}81\ \text{kG} + 2\cdot 0\ \text{kG}\\ &= -50{,}81\ \text{kG}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu(B) &= \mu(CO_2) + 2\,\mu(H_2O)\\ &= -394{,}36\ \text{kG} + 2\,(-237{,}18)\ \text{kG}\\ &= -868{,}72\ \text{kG}\end{aligned}$$

Die Werte von $\mu(CH_4)$, $\mu(O_2)$, $\mu(CO_2)$ und $\mu(H_2O)$ wurden Tab. 33.1 im Anhang entnommen.

Dass die Vorfaktoren in der Reaktionsgleichung in die Formel für das chemische Potenzial einer Stoffkombination übernommen werden müssen, sieht man leicht ein.

Man kann ja die Reaktionsgleichung (24.10) auch schreiben

$$\underbrace{CH_4 + O_2 + O_2}_{A} \rightarrow \underbrace{CO_2 + H_2O + H_2O}_{B}$$

Wir bilden nun die chemischen Potenziale $\mu(A)$ und $\mu(B)$ durch Aufsummieren der chemischen Potenziale der Bestandteile der Stoffkombinationen A und B:

$$\begin{aligned}\mu(A) &= \mu(CH_4) + \mu(O_2) + \mu(O_2)\\ &= \mu(CH_4) + 2\,\mu(O_2)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu(B) &= \mu(CO_2) + \mu(H_2O) + \mu(H_2O)\\ &= \mu(CO_2) + 2\mu(H_2O)\end{aligned}$$

und erhalten dieselben Ausdrücke wie vorher.

Wir sind jetzt in der Lage zu entscheiden, in welche Richtung eine chemische Reaktion laufen kann. Wir betrachten Reaktion (24.10). Reagiert Methan mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser, oder umgekehrt? Wir haben festgestellt, dass das chemische Potenzial der Stoffkombination A größer ist als das der Stoffkombination B. Also läuft die Reaktion von A nach B, von links nach rechts.

Um uns an die neue Methode zu gewöhnen, wenden wir sie zunächst auf einige Reaktionen an, von denen du sicher schon weißt, in welche Richtung sie laufen.

Die Knallgasreaktion

$$\underbrace{2\,H_2 + O_2}_{A} \rightarrow \underbrace{2\,H_2O}_{B}$$

$\mu(A) = 2\,\mu(H_2) + \mu(O_2) = 0$ kG
$\mu(B) = 2\,\mu(H_2O) = 2\,(-237{,}18)$ kG
$= -474{,}36$ kG
$\mu(A) - \mu(B) = 474{,}36$ kG

Die chemische Spannung ist, wie erwartet, positiv, die Reaktion läuft von links nach rechts, Wasserstoff verbrennt zu Wasser.

Die Verbrennung von Kohlenstoff

$$\underbrace{C + O_2}_{A} \rightarrow \underbrace{CO_2}_{B}$$

$\mu(A) = \mu(C) + \mu(O_2) = 0$ kG
$\mu(B) = \mu(CO_2) = -394{,}36$ kG
$\mu(A) - \mu(B) = 394{,}36$ kG

Auch diese Reaktion läuft von links nach rechts — was uns nicht überrascht.

Das Rosten von Eisen

$$\underbrace{2\,Fe_2O_3}_{A} \rightarrow \underbrace{4\,Fe + 3\,O_2}_{B}$$

$\mu(A) = 2\,\mu(Fe_2O_3) = 2\,(-742{,}24$ kG$)$
$= -1484{,}48$ kG
$\mu(B) = 4\,\mu(Fe) + 3\,\mu(O_2) = 0$ kG
$\mu(A) - \mu(B) = -1484{,}48$ kG

Das chemische Potenzial von A ist niedriger als das von B, die Reaktion läuft daher von rechts nach links, Eisen verrostet — wie jeder weiß.

Gold oxidiert nicht

$$\underbrace{2\,Au_2O_3}_{A} \rightarrow \underbrace{4\,Au + 3\,O_2}_{B}$$

$\mu(A) = 2\,\mu(Au_2O_3) = 2 \cdot 163{,}30$ kG
$= 326{,}60$ kG
$\mu(B) = 4\,\mu(Au) + 3\,\mu(O_2) = 0$ kG
$\mu(A) - \mu(B) = 326{,}60$ kG

Diese Reaktion läuft wieder von links nach rechts, Goldoxid zerfällt von selbst, Gold „rostet" nicht.

Der Nullpunkt des chemischen Potenzials

Beim Aufsuchen der Werte des chemischen Potenzials ist dir sicher aufgefallen, dass die chemischen Elemente das chemische Potenzial 0 kG haben. Dies ist kein Zufall, sondern es ist so festgelegt worden. Genauso, wie man den Nullpunkt des elektrischen Potenzials, der Temperatur und der Geschwindigkeit willkürlich festlegen muss, so muss man auch den Nullpunkt des chemischen Potenzials festlegen. Das Besondere beim chemischen Potenzial: Es gibt so viele Nullpunkte wie es chemische Elemente gibt.

Eins muss man bei dieser Festlegung noch beachten: Das chemische Potenzial eines Stoffes ist 0 kG, wenn der Stoff in seiner stabilsten Form vorliegt. So wurde also nicht etwa das chemische Potenzial $\mu(H)$ des atomaren, sehr instabilen Wasserstoffs Null gesetzt, sondern das chemische Potenzial $\mu(H_2)$ des molekularen Wasserstoffs.

Die Herstellung von Stoffen mit hohem chemischen Potenzial aus Stoffen mit niedrigem chemischen Potenzial

Eine Reaktion läuft von selbst vom hohen zum niedrigen chemischen Potenzial, sie läuft „den Potenzialberg hinunter". Wenn man nicht aufpasst, könnte man den folgenden, falschen Schluss ziehen: Jeder Endstoff einer Reaktion hat ein niedrigeres chemisches Potenzial als jeder Ausgangsstoff. Dass das nicht zutreffen muss, zeigt das folgende Beispiel: die Bildung von Ethin aus Calciumcarbid und Wasser.

$$\underbrace{CaC_2 + 2\,H_2O}_{A} \rightarrow \underbrace{Ca(OH)_2 + C_2H_2}_{B}$$

$\mu(A) = \mu(CaC_2) + 2\,\mu(H_2O)$
$= -67{,}78$ kG $+ 2\,(-237{,}18)$kG $= -542{,}14$ kG
$\mu(B) = \mu(Ca(OH)_2) + \mu(C_2H_2)$
$= -896{,}76$ kG $+ 209{,}20$ kG $= -687{,}56$ kG
$\mu(A) - \mu(B) = 145{,}42$ kG

Das chemische Potenzial der Stoffkombination A ist größer als das der Stoffkombination B. Die Reaktion läuft daher von links nach rechts. Einer der Endstoffe, nämlich das Ethin, hat aber ein höheres Potenzial als jeder der beiden Ausgangsstoffe. Dieses hohe Potenzial wird wettgemacht durch das sehr tief liegende chemische Potenzial des anderen Endstoffs, des Calciumhydroxids.

Lösen als Reaktion

Auch das Lösen eines Stoffs in einem anderen ist eine chemische Reaktion, z. B. das Lösen von Kochsalz in Wasser:

$$\underbrace{NaCl}_{A} \rightarrow \underbrace{Na^+ + Cl^-}_{B}$$

Die Tabelle enthält auch die chemischen Potenziale von Ionen. Wir können daher die chemische Spannung eines Lösungsvorgangs berechnen. Nun ist allerdings das chemische Potenzial einer gelösten Ionensorte von der Konzentration der Ionen abhängig. Die in der Tabelle aufgeführten Potenzialwerte von Ionen beziehen sich auf einmolare Lösungen in Wasser. Wir können daher nur feststellen, ob man eine einmolare Lösung in Wasser herstellen kann oder nicht.

Für unseren Kochsalzlösungsvorgang ist:

$$\mu(A) = \mu(NaCl) = -384{,}04 \text{ kG}$$
$$\mu(B) = \mu(Na^+) + \mu(Cl^-)$$
$$= -261{,}89 \text{ kG} + (-131{,}26 \text{ kG}) = -393{,}15 \text{ kG}$$
$$\mu(A) - \mu(B) = 9{,}11 \text{ kG}$$

$\mu(A)$ ist größer als $\mu(B)$. Das bedeutet, dass sich eine einmolare Kochsalzlösung herstellen lässt: 1 mol Kochsalz pro 1 Liter fertige Lösung. Selbstverständlich kann man auch weniger NaCl lösen. Ob man mehr lösen kann, kann man aufgrund der Werte der Tabelle allerdings nicht entscheiden.

Aufgaben

1. Bestimme die chemische Spannung für die folgenden Reaktionen und gib an, ob die jeweilige Reaktion (unter Normalbedingungen) stattfinden kann oder nicht.
   a) $2\,Mg(\text{fest}) + O_2(\text{gasf.}) \rightarrow 2\,MgO(\text{fest})$
   b) $2\,Hg(\text{flüss.}) + O_2(\text{gasf.}) \rightarrow 2\,HgO(\text{rot, fest})$
   c) $C_5H_{12}(\text{flüss.}) + 8\,O_2(\text{gasf.}) \rightarrow 5\,CO_2(\text{gasf.}) + 6\,H_2O(\text{flüss.})$
   d) $12\,CO_2(\text{gasf.}) + 11\,H_2O(\text{flüss.})$
   $\rightarrow C_{12}H_{22}O_{11}(\text{fest}) + 12\,O_2(\text{gasf.})$
   e) $CuO(\text{fest}) + Zn(\text{fest}) \rightarrow Cu(\text{fest}) + ZnO(\text{fest})$
2. Gib Reaktionen an, bei denen CuO reduziert wird. Berechne die chemischen Spannungen.
3. Von welchen der folgenden Stoffe lässt sich eine einmolare Lösung in Wasser herstellen?
   I_2, KOH, NH_4Cl, NH_3, AgCl.

24.4 Chemisches Potenzial und Umsatzrate

Wir vergleichen drei miteinander verwandte Reaktionen: das Lösen von drei zweiwertigen Metallen in Salzsäure.

$$Mg + 2\,H^+ + 2\,Cl^- \rightarrow Mg^{2+} + 2\,Cl^- + H_2 \quad (24.11)$$

$$Zn + 2\,H^+ + 2\,Cl^- \rightarrow Zn^{2+} + 2\,Cl^- + H_2 \quad (24.12)$$

$$Cu + 2\,H^+ + 2\,Cl^- \rightarrow Cu^{2+} + 2\,Cl^- + H_2 \quad (24.13)$$

Wir berechnen zunächst die chemischen Spannungen:

zu (24.11) $\mu(A) - \mu(B) = 456{,}01$ kG
zu (24.12) $\mu(A) - \mu(B) = 147{,}03$ kG
zu (24.13) $\mu(A) - \mu(B) = -65{,}52$ kG

Die Spannung der ersten Reaktion ist groß, die der zweiten ist kleiner und die der dritten negativ.

Wir führen die Reaktionen durch, oder besser, wir versuchen, sie durchzuführen. Das Magnesium löst sich unter heftiger Wasserstoffentwicklung schnell auf. Das Auflösen des Zinks dauert sehr lange, die Wasserstoffbildung ist viel ruhiger als beim Magnesium. Und mit dem Kupfer passiert gar nichts.

Wir ziehen hieraus die Folgerung:

> Die Umsatzrate ist umso größer, je größer die chemische Spannung ist.

Dieser Satz ist zwar richtig, er könnte aber doch zu falschen Schlüssen verleiten, denn er ist noch nicht vollständig. Die Umsatzrate hängt nämlich nicht nur von der chemischen Spannung ab. Genauso wie der elektrische Strom nicht nur von der elektrischen Spannung, und der Entropiestrom nicht nur von der Temperaturdifferenz abhängt.

24.5 Der Reaktionswiderstand

Sehr oft läuft eine Reaktion nicht ab, obwohl sie es sollte — wenigstens wenn es nur nach der chemischen Spannung ginge. Man kann Benzin in einem offenen Behälter auf den Tisch stellen, ohne dass es verbrennt. Man kann Wasserstoff und Sauerstoff mischen, ohne dass das Gemisch explodiert. „Natürlich explodiert es nicht, man muss es ja erst noch anzünden“, wirst du sagen. Richtig – aber warum reagieren die Stoffe nicht, ohne dass man sie anzündet? Warum läuft die Reaktion nicht vom hohen zum niedrigen chemischen Potenzial?

Man sieht, dass es nicht genügt, dass ein Antrieb für die Reaktion vorhanden ist. Und das ist im Grunde auch gar nicht überraschend. Man hätte es von Anfang an erwarten können. Schließlich strömt die Luft aus einem Autoreifen (normalerweise) auch nicht nach draußen, obwohl der Druck außerhalb des Reifens niedriger ist als innerhalb, obwohl also ein Antrieb vorhanden ist. Die Reifenwand hindert sie daran, Abb. 24.1.

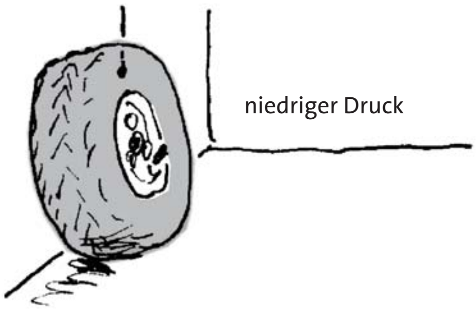


Abb. 24.1 Die Luft strömt nicht von der Stelle hohen Drucks (dem Innern des Reifens) zur Stelle niedrigen Drucks (außerhalb des Reifens).

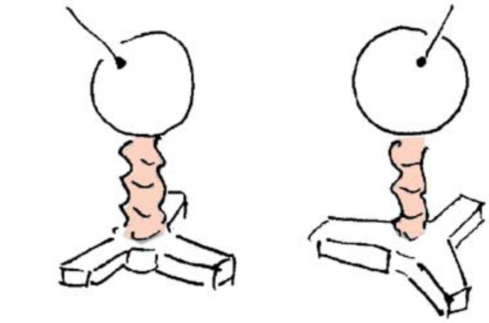


Abb. 24.2 Die Elektrizität strömt nicht von der Stelle hohen elektrischen Potenzials (linke Kugel) zur Stelle niedrigen elektrischen Potenzials (rechte Kugel).

Auch die Elektrizität auf der linken Kugel in Abb. 24.2 fließt nicht dahin, wo sie eigentlich hinfließen möchte, nämlich auf die rechte Kugel. Der elektrische Widerstand der Luft zwischen den beiden Kugeln ist zu groß.

Auch dass eine chemische Reaktion nicht abläuft, obwohl eine chemische Spannung vorhanden ist, liegt daran, dass hier ein zu großer Widerstand existiert. Wir sagen, der Reaktionswiderstand ist zu groß, die Reaktion ist gehemmt.

Der Reaktionswiderstand kann größer oder kleiner sein, und er kann auch sehr klein oder sehr groß sein. Zwei Reaktionen mit gleicher chemischer Spannung können sehr verschieden schnell ablaufen, d. h. mit sehr verschiedener Umsatzrate – je nach der Größe des Reaktionswiderstandes.

Man kann die Tätigkeit der Chemiker, etwas vereinfachend, so beschreiben: Sie möchten bestimmte Reaktionen ablaufen lassen und andere Reaktionen am Ablauf hindern.

Eines der Mittel, den Reaktionsablauf zu beeinflussen, ist, dass man den Reaktionswiderstand geeignet einrichtet – verkleinert oder vergrößert, je nach Bedarf.

Es ist ähnlich wie in der Elektrotechnik. Hier stellt man Verbindungen her durch Leitungen aus einem Material, das einen geringen Widerstand hat, und man unterbindet Ströme mithilfe von Materialien, die die Elektrizität schlecht leiten.

Wovon hängt nun der Widerstand einer chemischen Reaktion ab? Wie kann man den Widerstand beeinflussen?

Abb. 24.3a zeigt ein Becherglas mit Salzsäure, daneben ein Stück Magnesium. Wenn es wirklich nur nach der chemischen Spannung ginge, so müssten die beiden Stoffe miteinander reagieren. Natürlich tun sie das nicht. Die Reaktion ist ge-

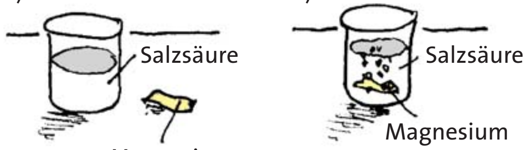


Abb. 24.3 (a) Magnesium und Salzsäure reagieren nicht, die Reaktion ist gehemmt. (b) Magnesium und Salzsäure reagieren.

hemmt. In diesem Fall ist es ganz einfach, den Reaktionswiderstand zu vermindern: Es genügt, die beiden Stoffe zusammenzubringen, also das Magnesium in die Salzsäure zu werfen, Abb. 24.3b, oder die Salzsäure über das Magnesium zu gießen.

Man kann den Reaktionswiderstand weiter vermindern, indem man den Kontakt zwischen den Reaktionspartnern verbessert, indem man die Reaktionspartner gut miteinander mischt. Feste Stoffe müssen vorher gut zermahlen werden. Ein großer NaCl-Kristall, der ruhig im Wasser liegt, löst sich nur sehr langsam auf. Der Reaktionswiderstand ist sehr groß. Zermahlt man aber den Kristall, schüttet das Pulver in das Wasser und rührt gut um, so ist der Widerstand des Lösungsvorgangs viel geringer, die Umsatzrate viel größer.

> Vermischen vermindert den Reaktionswiderstand.

Oft hilft aber auch gutes Mischen nicht. Die Reaktion

$$Cu + S \rightarrow CuS,$$

deren chemische Spannung positiv ist, kommt nicht in Gang trotz guter Vermischung. Man bringt sie aber zum Laufen durch Erhitzen, durch Erhöhen der Temperatur.

Es genügt dabei, die Ausgangsstoffe an einer Stelle zu entzünden. Sobald die Reaktion begonnen hat, entsteht Entropie. Dadurch nimmt die Temperatur in der Umgebung dieser Stelle zu, und die Reaktion kommt auch hier in Gang. Die Reaktion läuft also von selbst weiter. Wir folgern also:

> Erhöhung der Temperatur vermindert den Reaktionswiderstand.

Reaktionen wie diese, also Reaktionen, die erst zu laufen beginnen, wenn man die Ausgangsstoffe entzündet hat, gibt es viele. Die Verbrennung aller bekannten Brennstoffe – Heizöl, Kohle, Benzin, Erdgas, Wasserstoff – gehört zu dieser Klasse von Reaktionen.

Neben diesen etwas groben Methoden der Verminderung des Reaktionswiderstandes gibt es noch elegantere: Man setzt den Stoffen, die reagieren sollen, einen Katalysator zu. Der Katalysator bewirkt, dass die Reaktion abläuft. Seine Menge ändert sich beim Reaktionsablauf nicht. In anderen Worten: Durch Hinzugeben des Katalysators wird die Reaktion eingeschaltet, durch Wegnehmen des Katalysators wird sie ausgeschaltet.

> Ein Katalysator vermindert den Reaktionswiderstand.

Ein einfaches Beispiel: Die chemische Spannung der Reaktion

$$2\,H_2O_2 \rightarrow 2\,H_2O + O_2$$

ist positiv. Das Wasserstoffperoxid H_2O_2 sollte also, wenn es nur nach der chemischen Spannung ginge, von selbst in Wasser und Sauerstoff zerfallen. Er tut es aber nicht, die Reaktion ist gehemmt. Wir geben nun in ein Reagenzglas mit Wasserstoffperoxid etwas „Dreiwegekatalysator“ (wie er im Auto verwendet wird): Sofort setzt die Entwicklung eines Gases ein, Abb. 24.4. Die Glimmspanprobe zeigt, dass es sich um Sauerstoff handelt. Bei dieser Reaktion ändert sich die Menge des Katalysators nicht. Die Reaktion läuft so lange, wie noch Wasserstoffperoxid vorhanden ist.

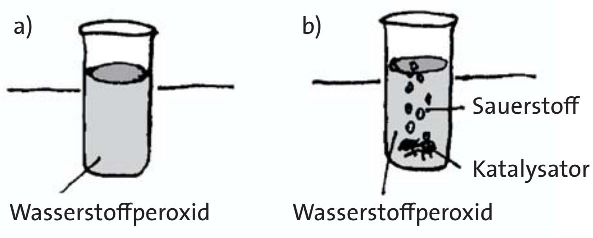


Abb. 24.4 (a) Das Wasserstoffperoxid zerfällt nicht. (b) Durch Zugeben eines Katalysators wird die Zerfallsreaktion eingeschaltet.

Die Abgase von Benzinmotoren enthalten Umweltgifte: Stickstoffmonoxid NO, Kohlenstoffmonoxid CO und unverbranntes Benzin. Die Abgase enthalten diese Stoffe nur deshalb, weil die Verbrennung im Innern des Motors nicht zu

Ende gelaufen ist. Wären die Reaktionen so gelaufen wie es den chemischen Spannungen entspricht, so wäre keiner dieser Stoffe entstanden. Man lässt daher die Abgase über einen Katalysator strömen. Dieser bewirkt zum einen, dass die Reste des Benzins verbrennen:

$$2\,C_8H_{18} + 25\,O_2 \rightarrow 16\,CO_2 + 18\,H_2O.$$

(C_8H_{18} ist Oktan, einer der Hauptbestandteile des Benzins.) Zum anderen schaltet der Katalysator die Reaktion

$$2\,CO + 2\,NO \rightarrow N_2 + 2\,CO_2$$

ein, bei der die giftigen Stoffe CO und NO in die ungiftigen Stoffe N_2 und CO_2 verwandelt werden. (Das CO_2 hat allerdings auch schädliche Wirkungen für die Umwelt: es trägt zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei).

Besonders wichtig sind Katalysatoren für Reaktionen in biologischen Systemen. In einem solchen System können Tausende verschiedener Reaktionen ablaufen. Und wenn es nur nach der chemischen Spannung ginge, so liefen sie auch alle ab, und nach kurzer Zeit hätte sich der Organismus in fast nichts als Kohlenstoffdioxid und Wasser verwandelt. Nun sind aber die meisten dieser Reaktionen gehemmt, sie laufen von selbst gar nicht ab. Ihr Ablauf wird erst durch Katalysatoren ermöglicht, und zwar jede durch einen anderen. Diese biologischen Katalysatoren heißen Enzyme. Der Ablauf biochemischer Reaktionen wird also durch die Enzyme gesteuert. Die Enzyme wirken wie ein kompliziertes System chemischer Schalter.

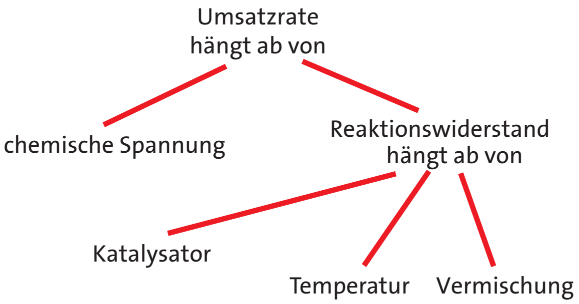


Abb. 24.5 Zusammenhang zwischen Umsatzrate, chemischer Spannung und Reaktionswiderstand

Wir haben in diesem und im vorangehenden Abschnitt gesehen, dass die Umsatzrate einer Reaktion von zwei Dingen abhängt:

1. von der chemischen Spannung und
2. vom Reaktionswiderstand.

Außerdem haben wir untersucht, wovon der Reaktionswiderstand abhängt. In Abb. 24.5 sind alle diese Abhängigkeiten noch einmal zusammengefasst.

Aufgaben

1. Nenne Reaktionen, die, auch wenn die Reaktionspartner gut gemischt sind, einen hohen Reaktionswiderstand haben.
2. Nenne Reaktionen, deren Reaktionswiderstand gering ist, falls die Reaktionspartner miteinander in Kontakt gebracht werden.
3. Ein Sprengstoff ist ein Stoff, der von selbst in andere Stoffe zerfallen kann. Sein chemisches Potenzial ist höher als das der Zerfallsprodukte. Was kann man über den Widerstand der Reaktion sagen?

25 STOFFMENGE UND ENERGIE

25.1 Reaktionspumpen

„Eine Reaktion läuft von selbst vom hohen zum niedrigen chemischen Potenzial“, hatten wir festgestellt. Man möchte nun aber oft, dass eine Reaktion in die entgegengesetzte Richtung läuft. Man möchte eine Reaktion oft so laufen lassen, dass das chemische Potenzial der Endstoffkombination höher ist als das der Ausgangsstoffkombination.

So möchte man zum Beispiel Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen. Die Reaktion

$$2\,H_2O \rightleftharpoons 2\,H_2 + O_2 \qquad (25.1)$$

soll also von links nach rechts laufen, d. h. gegen ihren natürlichen Antrieb. Oder man möchte Natrium herstellen aus Kochsalz nach

$$2\,NaCl \rightleftharpoons 2\,Na + Cl_2.$$

Die Reaktion läuft von selbst von rechts nach links. Wir möchten aber, dass sie von links nach rechts läuft.

Im Prinzip ist uns das Problem, das wir lösen wollen, schon von früher bekannt: Manchmal möchte man, dass Luft entgegen ihrem natürlichen Antrieb vom niedrigen zum hohen Druck strömt. Man erreicht dies durch eine Luftpumpe oder einen Kompressor, Abb. 25.1.

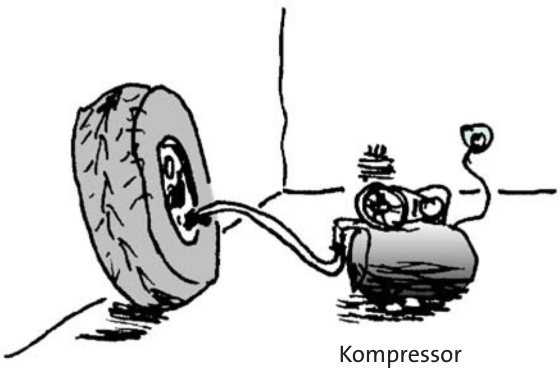


Abb. 25.1 Der Kompressor befördert Luft von Stellen niedrigen zu Stellen hohen Drucks.

Oder man möchte Entropie von niedriger zu hoher Temperatur befördern.

Dies erreicht man mit einer Wärmepumpe, Abb. 25.2. Was wir brauchen, um eine Reaktion vom niedrigen zum hohen chemischen Potenzial laufen zu lassen, ist also auch eine Art Pumpe: eine Reaktionspumpe. Solche Pumpen gibt es tatsächlich, und sie spielen eine wichtige Rolle in der chemischen Technik. Sie heißen elektrochemische Zellen.

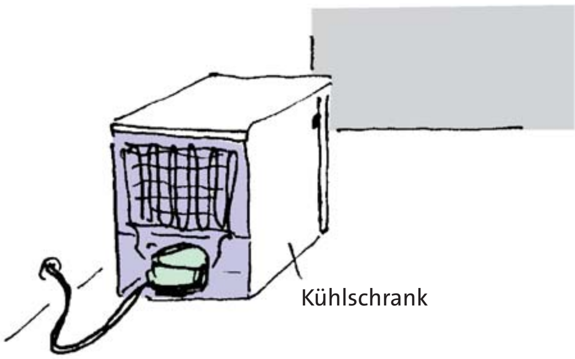


Abb. 25.2 Die Wärmepumpe befördert Entropie von Stellen niedriger zu Stellen hoher Temperatur.

Abb. 25.3 zeigt eine elektrochemische Zelle, mit der Wasser zerlegt werden kann, also eine Re-

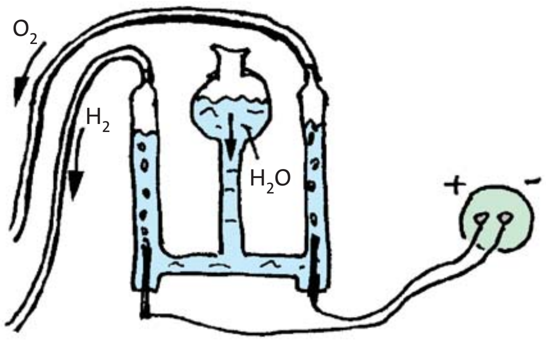


Abb. 25.3 Die elektrochemische Zelle arbeitet als „Reaktionspumpe“.

aktionspumpe für die Reaktion (25.1). Den Vorgang der Zerlegung eines Stoffes mit einer solchen Reaktionspumpe nennt man Elektrolyse.

Damit die Reaktionspumpe arbeitet, muss man sie an eine elektrische Energiequelle anschließen — genauso wie auch eine Luftpumpe oder eine Wärmepumpe.

25.2 Umsatzrate und Energiestrom

In Abb. 25.4 ist das Energieflussbild der elektrochemischen Zelle von Abb. 25.3 dargestellt.

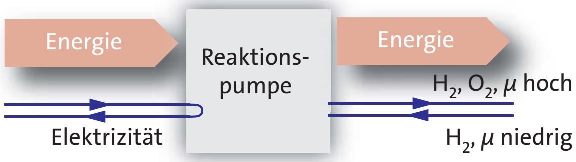


Abb. 25.4 Energieflussbild einer Reaktionspumpe

Abb. 25.5 zeigt zum Vergleich noch einmal das Flussbild einer Wasserpumpe und Abb. 25.6 das einer Wärmepumpe. Wir sehen, dass eine Reaktionspumpe ein Energieumlader ist. Sie bekommt

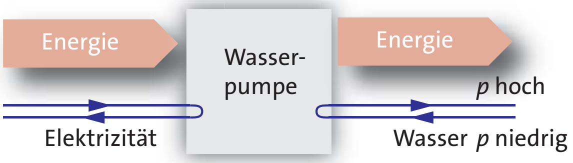


Abb. 25.5 Energieflussbild einer Wasserpumpe

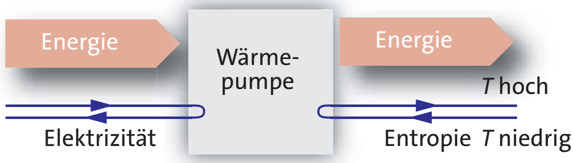


Abb. 25.6 Energieflussbild einer Wärmepumpe

die Energie mit dem Träger Elektrizität, und sie gibt sie mit den Reaktionsprodukten wieder ab.

In die Zelle kommt auch Energie mit den Ausgangsstoffen der Reaktion hinein. Mit den Endstoffen kommt aber mehr Energie wieder heraus als mit den Ausgangsstoffen hineingegangen ist. Die Differenz ist gerade die von der Elektrizität übernommene Energie.

Es ist klar, dass in der Zelle eine umso größere Stoffmenge umgesetzt wird, je mehr Energie ihr zugeführt wird. Da die Energie, die in die Zelle hineinfließt, auch wieder herauskommt, können wir sagen: Je mehr Energie durch die Zelle fließt, desto größer ist der Umsatz.

Wir können diese Feststellung auch quantitativ formulieren. Abb. 25.7a zeigt eine elektrochemische Zelle. Durch diese Zelle fließt ein Energiestrom einer bestimmten Stärke und die

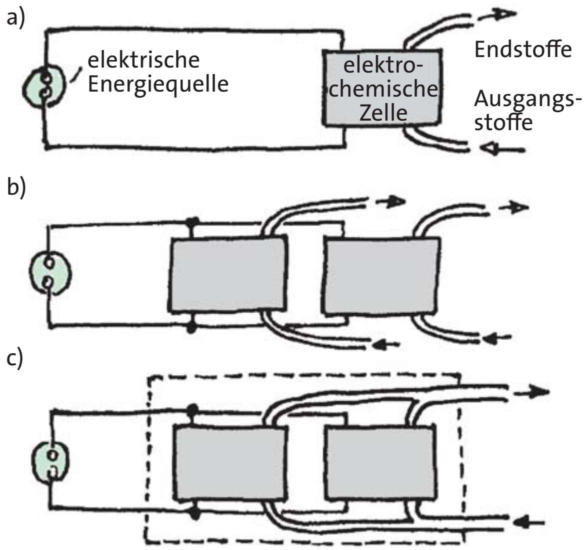


Abb. 25.7 (a) Elektrochemische Zelle. (b) In zwei parallel geschalteten Zellen sind Umsatzrate und Energiestromstärke doppelt so groß wie in einer einzigen. (c) Die parallel geschalteten Zellen werden als eine einzige, große Zelle aufgefasst.

Reaktion in der Zelle hat eine bestimmte Umsatzrate. In Abb. 25.7b sind zwei Zellen parallel geschaltet. Jede sei genauso gebaut wie die in Abb. 25.7a.

Durch beide Zellen zusammen fließt natürlich ein Energiestrom, der zweimal so groß ist wie der in Abb. 25.7a, und es wird auch doppelt so viel umgesetzt. Wir können nun die beiden parallel geschalteten Zellen auch als eine einzige große Zelle auffassen, Abb. 25.7c. Aus dem Vergleich der kleinen Zelle, Abb. 25.7a, und der großen, Abb. 25.7c, folgt, dass der Reaktionsumsatz in einer Zelle proportional zur Stärke des hindurchfließenden Energiestroms ist:

$$P \sim I_n(\mathrm{R})\,. \qquad (25.2)$$

Es fehlt uns noch der Proportionalitätsfaktor. Wir betrachten zwei Zellen, in denen verschiedene Reaktionen ablaufen. In der einen wird Wasser zersetzt, in der anderen wird aus Salzsäure Wasserstoff und Chlor hergestellt. Wir lassen die Reaktionen so laufen, dass die Umsatzraten in beiden Zellen gleich sind. Wir stellen fest, dass die Zellen verschieden viel Energie verbrauchen. Bei gleichem $I_n(\mathrm{R})$ ist P unterschiedlich. Der Proportionalitätsfaktor, der die Beziehung (25.2) zu einer Gleichung machen würde, hängt also davon ab, was für eine Reaktion in der Zelle abläuft. Er hat für verschiedene Reaktionen verschiedene Werte. Wir wissen, dass sich verschiedene Reaktionen in der chemischen Spannung unterscheiden. Tatsächlich sieht auch die fertige Beziehung zwischen Umsatzrate und Energiestromstärke einfach so aus:

$$P = (\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B})) \cdot I_n(\mathrm{R}). \qquad (25.3)$$

d. h., der Proportionalitätsfaktor ist die chemische Spannung. Dass hier einfach die chemische Spannung steht, hat den folgenden Grund: Die chemische Spannung, und damit das chemische Potenzial, ist über Gleichung (25.3) definiert. Das bedeutet, dass man die Gleichung dazu benutzen kann, eine chemische Spannung zu messen: Man misst die Energiestromstärke P, die Umsatzrate $I_n(\mathrm{R})$ und dividiert:

$$\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B}) = \frac{P}{I_{n(\mathrm{R})}}.$$

$\mu(\mathrm{A})$ ist das höhere, $\mu(\mathrm{B})$ das niedrigere chemische Potenzial.

Ist die chemische Spannung einer Reaktion bekannt, so kann man Gleichung (25.3) benutzen, um zu berechnen, wie viel Energie pro Sekunde in einer Zelle umgeladen wird — von der Elektrizität auf die Reaktionsprodukte.

Wir ersetzen in Gleichung (25.3) noch

$$P = \frac{E}{t}$$

und

$$I_{n(\mathrm{R})} = \frac{n(\mathrm{R})}{t}$$

und erhalten

$$E = (\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B})) \cdot n(\mathrm{R})$$

Diese Gleichung sagt uns, welche Energiemenge pro umgesetztes Mol man braucht, um die Reaktion A $\leftrightarrow$ B gegen ihren natürlichen Antrieb laufen zu lassen.

Beispiel

Wie viel Energie wird gebraucht, um 1 kg Wasser zu zersetzen? Die Reaktion

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$$

soll also von rechts nach links „gepumpt" werden. Für Wasser ist

$$m/n = 0{,}018 \text{ kg/mol}.$$

1 kg Wasser enthält also 55,56 mol. Der Reaktionsumsatz ist

$$n(\mathrm{R}) = n(H_2O)/2 = 55{,}56 \text{ mol}/2 = 27{,}78 \text{ mol}.$$

Die chemische Spannung der Reaktion hatten wir früher schon berechnet:

$$(\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B})) = 474{,}36 \text{ kG}.$$

Wir erhalten damit

$$E = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot n(R)$$
$$= 474{,}36 \text{ kG} \cdot 27{,}78 \text{ mol}$$
$$= 13\,178 \text{ kJ} \approx 13 \text{ MJ}$$

Du erinnerst dich, dass wir eine Formel, die ganz ähnlich ist wie Gleichung (25.3), benutzt hatten, um zu berechnen, wie viel Energie pro Sekunde in einer Wärmepumpe von der Elektrizität auf die Entropie umgeladen wird:

$$P = (T(A) - T(B)) \cdot I_S$$

(T = absolute Temperatur, I_S = Entropiestromstärke).

Und wir kennen noch eine weitere Formel dieses Typs: Um die Stärke des Energiestroms zu berechnen, der mit einem elektrischen Kabel übertragen wird, benutzt man

$$P = (\varphi(A) - \varphi(B)) \cdot I$$

(φ = elektrisches Potenzial, I = elektrische Stromstärke).

Aufgaben

1. Wie viel Energie wird gebraucht, um aus Kochsalz 1 kg Natrium zu gewinnen?
2. Wie viel Energie braucht man, um 2 mol Blei aus Bleichlorid zu gewinnen?

25.3 Die Umkehrung der Reaktionspumpe

In einer Reaktionspumpe wird Energie umgeladen. Die Energie kommt mit Elektrizität in die Zelle hinein und kommt mit den Reaktionsprodukten wieder heraus. Wie zu jedem anderen Energieumlader gibt es auch zur Reaktionspumpe eine Umkehrung. Das entsprechende Gerät ist dir sogar gut bekannt. Es begegnet einem in den verschiedensten Versionen mit den verschiedensten Namen: Batterie, Akku, Monozelle, Brennstoffzelle etc.

Auch alle diese Geräte bezeichnen wir als elektrochemische Zellen. Elektrochemische Zellen können also in zwei Richtungen laufen: entweder als „Reaktionspumpe" — siehe den vorigen Abschnitt — oder als „Elektrizitätspumpe".

In Abb. 25.8a und b sind die Energieflussbilder von zwei elektrochemischen Zellen dargestellt. Die in Abb. 25.8a arbeitet als Reaktionspumpe für die Reaktion B → A. Die Zelle von Abb. 25.8b läuft als Elektrizitätspumpe. Hier läuft die Reaktion von A nach B, d. h. in die natürliche Richtung; dafür wird Elektrizität vom niedrigen zum hohen Potenzial befördert.

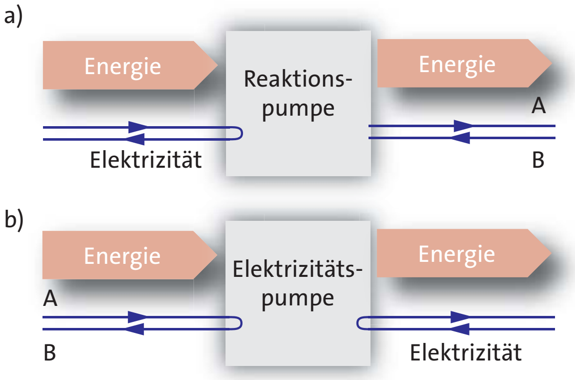


Abb. 25.8 Energieflussbilder einer Reaktionspumpe (a) und einer Elektrizitätspumpe (b)

Leider sind für die chemischen Elektrizitätspumpen viele verschiedene Fachausdrücke gebräuchlich.

Brennstoffzelle

Falls der Zelle die Ausgangsstoffe kontinuierlich zugeführt und die Endstoffe kontinuierlich entzogen werden, nennt man die Zelle eine Brennstoffzelle. Ein Beispiel ist die Wasserstoff-Brennstoffzelle. In ihr reagieren Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser.

Eine Brennstoffzelle tut im Wesentlichen dasselbe wie ein Wärmekraftwerk. Sie bekommt ihre Energie mit der Stoffkombination „Brennstoff + Sauerstoff" und gibt sie ab mit Elektrizität. Eine Brennstoffzelle hat gegenüber einem Wärmekraftwerk große Vorteile: Sie hat geringere Energieverluste, und sie arbeitet vollkommen geräuschlos. Trotzdem sind Brennstoffzellen für die Versorgung mit elektrischer Energie zur Zeit noch nicht zu gebrauchen: Man kann sie nicht mit Kohle oder Heizöl betreiben, d. h. den Brennstoffen, von denen es am meisten gibt.

Monozelle, Babyzelle, Knopfzelle

Hier sind die Ausgangsstoffe der Reaktion bereits in der Zelle enthalten, und die Endstoffe werden auch nicht abgeführt. Wenn die Ausgangsstoffe aufgebraucht sind, ist mit der Zelle nichts mehr anzufangen.

Solche Zellen werden oft Batterien genannt. Dieser Ausdruck ist aber, wie wir gleich sehen werden, eigentlich nicht korrekt.

Akkumulator

Ein Akkumulator, oder kurz Akku, ist eine Zelle, die man in beiden Richtungen betreiben kann: als Reaktionspumpe und als Elektrizitätspumpe. Ausgangs- und Endstoffe bleiben im Akkumulator.

Man kann den Akkumulator daher als Energiespeicher verwenden. Beim Laden mit Energie pumpt man eine chemische Reaktion in die Richtung, die ihrem natürlichen Antrieb entgegengesetzt ist, vom niedrigen zum hohen chemischen Potenzial. Beim Entladen läuft die Reaktion vom hohen zum niedrigen Potenzial. Dabei wird Elektrizität vom niedrigen zum hohen elektrischen Potenzial befördert. Der bekannteste Akku ist der Bleiakkumulator des Autos, die „Autobatterie".

Batterien

Man spricht von einer Batterie, wenn mehrere Zellen hintereinander geschaltet sind. So besteht die 12-V-Autobatterie aus 6 hintereinander geschalteten 2-V-Zellen, oder die 4,5-V-Flachbatterie aus 3 hintereinander geschalteten 1,5-V-Zellen.

Der Zusammenhang zwischen Energiestromstärke und Umsatzrate ist bei der chemischen Elektrizitätspumpe natürlich derselbe wie bei der Reaktionspumpe, d. h., auch hier ist

$$P = (\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B})) \cdot I_n(\mathrm{R})\,.$$

Wieder ist $\mu(\mathrm{A})$ das höhere und $\mu(\mathrm{B})$ das niedrigere chemische Potenzial. P ist die Stärke des Energiestroms, der mit den Stoffen in die Zelle hinein- und mit der Elektrizität wieder herausfließt. Und auch hier gilt für den Zusammenhang zwischen Energiemenge und umgesetzter Stoffmenge:

$$E = (\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B})) \cdot n(\mathrm{R}).$$

Beispiel

Wir betrachten die Reaktion, die in einer Wasserstoff-Brennstoffzelle abläuft:

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O.$$

Wie viel elektrizitätsgetragene Energie liefert die Zelle, wenn 1 kg Wasser entsteht?

Wir haben die Rechnung bereits im vorigen Abschnitt durchgeführt, als wir nach der Energie gefragt haben, die benötigt wird, um 1 kg Wasser zu zersetzen. Es hatte sich ergeben $E = 13$ MJ.

Aufgaben

1. In einer Brennstoffzelle reagiert Methan mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Wie viel Joule liefert die Zelle pro Sekunde bei einer Umsatzrate von 1 mol/s?
2. Im Bleiakkumulator läuft die folgende Reaktion ab:
   $Pb + PbO_2 + 4\,H^+ + 2\,SO_4^{2-} \rightleftharpoons 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O$,
   und zwar beim Laden nach links und beim Entladen nach rechts.
   a) Wie groß ist die Umsatzrate, wenn der Akku pro Sekunde 100 Joule abgibt?
   b) Beim Laden werden 2 kg Bleisulfat in Blei und Bleioxid verwandelt. Wie viel Energie wird dabei gespeichert?

26 WÄRMEBILANZ VON REAKTIONEN

26.1 Entropieerzeugung bei chemischen Reaktionen

Wir wollen die chemische Reaktion

$$A \to B$$

ablaufen lassen, und zwar kontinuierlich, ununterbrochen. Die Stoffe werden so gewählt, dass $\mu(A)$ größer ist als $\mu(B)$. Wir wissen, dass man mit dieser Reaktion Energie gewinnen kann. Bei der Verwandlung der Stoffe A in die Stoffe B wird Energie abgegeben. Die Stärke des Energiestroms berechnet sich nach:

$$P = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_n(R).$$

Man kann nun mit dieser Energie zweierlei anfangen. Entweder man benutzt sie, um irgendetwas anderes hinaufzupumpen, also z. B. um Elektrizität von niedrigem auf hohes Potenzial zu bringen. Das wurde im vorigen Abschnitt ausführlich diskutiert.

Oder man lässt die Reaktion einfach frei laufen, ohne irgendetwas zu pumpen oder anzutreiben. In diesem Fall wird die ganze Energie dazu verbraucht, Entropie zu erzeugen. Um einen Entropiestrom mit der Stromstärke $I_{S\,\text{erzeugt}}$ zu erzeugen, braucht man einen Energiestrom der Stärke

$$P = T \cdot I_{S\,\text{erzeugt}}.$$

Wenn wir die ganze Energie, die bei einer chemischen Reaktion abgegeben wird, zur Entropieerzeugung verwenden — oder besser: verschwenden —, so muss gelten:

$$(\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_n(R) = T \cdot I_{S\,\text{erzeugt}}.$$

Daraus können wir die pro Sekunde erzeugte Entropiemenge berechnen:

$$I_{S\,\text{erzeugt}} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} I_{n(R)}.$$

Setzen wir noch

$$I_{S\,\text{erzeugt}} = S_{\text{erzeugt}}/t$$

und

$$I_n(R) = n(R)/t$$

ein

$$\frac{S_{\text{erzeugt}}}{t} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} \cdot \frac{n(R)}{t}.$$

und multiplizieren beide Seiten mit t, so erhalten wir:

$$S_{\text{erzeugt}} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} \cdot n(R). \qquad (26.1)$$

Diese Gleichung sagt uns, welche Entropiemenge erzeugt wird, wenn ein bestimmter Stoffumsatz $n(R)$ stattfindet. Von einer Reaktion, bei der mit der Energie nichts gemacht wird als Entropieerzeugung, sagt man, sie laufe frei ab.

> Bei jeder frei ablaufenden Reaktion wird Entropie erzeugt.

Man könnte auf die Idee kommen, daraus den folgenden Schluss zu ziehen: Bei jeder frei ablaufenden Reaktion wird es warm. Denn wir wissen ja: Wenn die Entropie zunimmt, nimmt auch die Temperatur zu. Dieser Schluss ist aber falsch. Wir überzeugen uns davon am besten mithilfe eines Experiments.

Wir mischen zwei feste Stoffe miteinander: Bariumhydroxid, das recht viel Kristallwasser enthält, und Ammoniumnitrat. Die Stoffe reagieren und es entsteht Ammoniakgas, flüssiges Wasser und Bariumnitrat:

$$Ba(OH)_2 \cdot 8\,H_2O + 2\,NH_4NO_3$$
$$\rightarrow 2NH_3 + 10\,H_2O + Ba(NO_3)_2\,.$$

Das Merkwürdige an dieser Reaktion ist, dass die Endstoffe sehr kalt sind. Wir messen nach und finden eine Temperatur von weniger als −10 °C. Was ist passiert? Läuft die Reaktion vielleicht in die falsche Richtung, vom niedrigen zum hohen chemischen Potenzial? Wird vielleicht Entropie vernichtet? Das wäre sensationell. Wir werden gleich sehen, dass das nicht der Fall ist.

Um zu verstehen, was hier vor sich gegangen ist, müssen wir die Entropiebilanz von Reaktionen etwas sorgfältiger untersuchen.

Aufgaben

1. Wie viel Entropie wird bei der Verbrennung von 1 kg Benzin erzeugt? (Rechne mit Oktan C_8H_{18}, einem der Hauptbestandteile des Benzins.)
2. Wie viel Entropie wird beim Verrosten von 1 kg Eisen erzeugt?

26.2 Die Entropiebilanz chemischer Reaktionen

Wir haben einen wichtigen Punkt bisher noch nicht berücksichtigt. Wir betrachten die Reaktion

$$A \rightarrow B$$

und nehmen zunächst an, es werde keine Entropie erzeugt, (so wie es in einer elektrochemischen Zelle der Fall ist). Bei der Reaktion verschwinden die Ausgangsstoffe, und die Endstoffe entstehen.

Die Ausgangsstoffe enthalten eine bestimmte Menge Entropie, und diese muss von den Endstoffen übernommen werden. Zu dieser Entropiemenge gehört nun aber im Allgemeinen bei den Ausgangsstoffen eine andere Temperatur als bei den Endstoffen. Bei manchen Reaktionen ist die Temperatur der Endstoffe niedriger, bei anderen ist sie höher als die der Ausgangsstoffe.

Es ist ähnlich, wie wenn man die Luft, die sich in einem Behälter A befindet, in einen anderen, zunächst leeren Behälter B bringt. In B wird die Luft im Allgemeinen nicht denselben Druck haben wie in A, Abb. 26.1.

In Tab. 33.1 im Anhang ist in der letzten Spalte für jeden Stoff der Entropieinhalt bei Normaltemperatur aufgeführt. Die Werte beziehen sich auf 1 mol des jeweiligen Stoffes. Die Tabelle enthält also die Größe S/n. Wir finden in der Tabelle zum Beispiel für Wasser:

$$S/n = 69{,}91\ \text{Ct/mol},$$

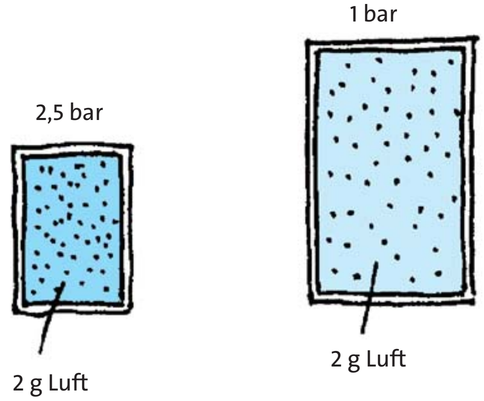


Abb. 26.1 Dieselbe Luftmenge hat in zwei verschiedenen Behältern unterschiedliche Drücke.

d. h. 1 mol Wasser enthält bei Normaltemperatur eine Entropiemenge von 69,91 Carnot.

Für Kohlenstoffdioxid findet man:

$$S/n = 213{,}64\ \text{Ct/mol},$$

d. h. 1 mol Kohlenstoffdioxid enthält bei Normaltemperatur 213,64 Ct. Wir verfügen nun über die Mittel, um die vollständige Entropiebilanz von Reaktionen aufzustellen.

Beim Bilanzieren können drei verschiedene Fälle auftreten. Wir betrachten für jeden dieser Fälle ein Beispiel. Wir machen die Bilanzen jeweils für einen Umsatz von 1 mol.

1. Fall

$$\underbrace{CH_4 + 2\,O_2}_{A} \rightarrow \underbrace{CO_2 + 2\,H_2O}_{B}$$

Wir entnehmen der Tabelle, wie viel Entropie die Ausgangs- und die Endstoffe bei Normaltemperatur haben:

$$\begin{aligned} S(\mathrm{A}) &= S(CH_4) + 2\,S(O_2) \\ &= 186{,}10\ \mathrm{Ct} + 2 \cdot 205{,}03\ \mathrm{Ct} = 596{,}16\ \mathrm{Ct} \\ S(\mathrm{B}) &= S(CO_2) + 2\,S(H_2O) \\ &= 213{,}64\ \mathrm{Ct} + 2 \cdot 69{,}91\ \mathrm{Ct} = 353{,}46\ \mathrm{Ct}. \end{aligned}$$

Es stellt sich heraus, dass die Endstoffe bei gleicher Temperatur weniger Entropie hätten als die Ausgangsstoffe. Wenn nun die Ausgangsstoffe vor dem Ablauf der Reaktion Umgebungstemperatur hatten, so müssen die Endstoffe die Entropiemenge 596,16 Ct übernehmen. Damit wird ihre Temperatur aber höher als Normaltemperatur, denn bei Normaltemperatur enthalten die Endstoffe nur eine Entropiemenge von 353,46 Ct. Wir können auch sagen, dass die Entropiemenge

$$S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) = 596{,}16\ \mathrm{Ct} - 353{,}46\ \mathrm{Ct} = 242{,}7\ \mathrm{Ct}$$

„übrig“ ist.

Nun wird aber bei der Reaktion auch noch Entropie erzeugt. Wir berechnen die erzeugte Entropie nach Gleichung (26.1):

$$S_{\mathrm{erzeugt}} = \frac{\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B})}{T} \cdot n(\mathrm{R}).$$

Für unsere Reaktion ist

$$\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B}) = 817{,}91\ \mathrm{kG}.$$

Wir hatten angenommen, dass

$$n(\mathrm{R}) = 1\ \mathrm{mol}$$

ist und

$$T = 298\ \mathrm{K}$$

Damit wird

$$S_{\mathrm{erzeugt}} = \frac{817{,}91\ \mathrm{kG}}{298\ \mathrm{K}} \cdot 1\ \mathrm{mol} = 2744{,}7\ \mathrm{Ct}\,.$$

Es werden also während des Reaktionsablaufs 2744,7 Ct erzeugt. Diese Entropie kommt zu der vorher berechneten übrigen Entropie noch hinzu. Die gesamte übrige Entropie ist also

$$\begin{aligned} &S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) + S_{\mathrm{erzeugt}} \\ &= 242{,}7\ \mathrm{Ct} + 2744{,}7\ \mathrm{Ct} = 2987{,}4\ \mathrm{Ct}. \end{aligned}$$

Diese überschüssige Entropie führt zu einer starken Erwärmung der Endprodukte.

2. Fall

$$\underbrace{C + O_2}_{A} \rightarrow \underbrace{CO_2}_{B}$$

$$\begin{aligned} S(\mathrm{A}) &= S(\mathrm{C}) + S(O_2) \\ &= 5{,}74\ \mathrm{Ct} + 205{,}03\ \mathrm{Ct} = 210{,}77\ \mathrm{Ct} \\ S(\mathrm{B}) &= 213{,}64\ \mathrm{Ct} \\ S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) &= -2{,}87\ \mathrm{Ct}. \end{aligned}$$

Diesmal wäre die Entropiemenge der Endstoffe bei Normaltemperatur größer als die der Ausgangsstoffe. Es ist also zunächst noch keine Entropie übrig. Würde keine Entropie erzeugt, so wären die Endstoffe kälter als die Anfangsstoffe. Es kommt allerdings noch die erzeugte Entropie hinzu. Mit

$$\mu(\mathrm{A}) - \mu(\mathrm{B}) = 394{,}36\ \mathrm{kG}$$

ergibt sich

$$S_{\mathrm{erzeugt}} = \frac{394{,}36\ \mathrm{kG}}{298\ \mathrm{K}} \cdot 1\ \mathrm{mol} = 1323{,}36\ \mathrm{Ct}\,.$$

Die Gesamtbilanz ergibt

$$\begin{aligned} &S(\mathrm{A}) - S(\mathrm{B}) + S_{\mathrm{erzeugt}} \\ &= -2{,}87\ \mathrm{Ct} + 1323{,}36\ \mathrm{Ct} = 1320{,}5\ \mathrm{Ct}. \end{aligned}$$

Es ist also wieder Entropie übrig. Die Reaktionsprodukte sind daher wärmer als die Ausgangsstoffe.

3. Fall

$$\underbrace{Ba(OH)_2 \cdot 8\,H_2O + 2\,NH_4NO_3}_{A}$$

$$\rightarrow \underbrace{2\,NH_3 + 10\,H_2O + Ba(NO_3)_2}_{B}$$

$$\begin{aligned} S(A) &= S(Ba(OH)_2 \cdot 8\,H_2O) + 2\,S(NH_4NO_3) \\ &= 426{,}77\ \text{Ct} + 2 \cdot 151{,}08\ \text{Ct} = 728{,}93\ \text{Ct} \\ S(B) &= 2\,S(NH_3) + 10\,S(H_2O) + S(Ba(NO_3)_2) \\ &= 2 \cdot 192{,}34\ \text{Ct} + 10 \cdot 69{,}91\ \text{Ct} + 213{,}80\ \text{Ct} \\ &= 1297{,}58\ \text{Ct} \end{aligned}$$

$$S(A) - S(B) = -568{,}65\ \text{Ct}.$$

Der Entropieinhalt der Endstoffe wäre bei Normaltemperatur viel größer als der der Ausgangsstoffe. Ohne Entropieerzeugung wären die Endstoffe daher viel kälter als die Ausgangsstoffe. Wir sehen nach, ob dieses Entropiedefizit durch die Entropieerzeugung noch wettgemacht werden kann.

Mit

$$\mu(A) - \mu(B) = 38{,}46\ \text{kG}$$

wird

$$S_{erzeugt} = \frac{38{,}46\ \text{kG}}{298\ \text{K}} \cdot 1\ \text{mol} = 129{,}1\ \text{Ct}$$

und die Gesamtbilanz ist

$$\begin{aligned} &S(A) - S(B) + S_{erzeugt} \\ &= -568{,}65\ \text{Ct} + 129{,}1\ \text{Ct} = -439{,}55\ \text{Ct}. \end{aligned}$$

Um die Reaktionsprodukte auf Normaltemperatur zu bringen fehlen 439,55 Ct. Die Temperatur der Endstoffe liegt daher weit unter der der Ausgangsstoffe.

Der letzte Fall, den wir untersucht haben, ist recht selten. Auch wenn $S(A)$ kleiner ist als $S(B)$, reicht die erzeugte Entropie meistens aus, um die Differenz $S(A) - S(B)$ auszugleichen, sodass insgesamt Entropie übrig ist.

Reaktionen, bei denen Entropie übrig ist (Fälle 1 und 2), nennt man exotherm. Reaktionen, bei denen Entropie fehlt, sodass die Anfangstemperatur nicht aufrechterhalten werden kann (Fall 3), heißen endotherm.

Aufgaben

1. Wird beim Verrosten von Eisen Entropie aufgenommen oder abgegeben? Wie viel wird aufgenommen bzw. abgegeben?
2. In eine einmolare wässrige $CaCl_2$-Lösung wird noch etwas zusätzliches $CaCl_2$ hineingeschüttet und aufgelöst. Wird die Lösung wärmer oder kälter?
3. In eine einmolare wässrige NaBr-Lösung wird noch etwas zusätzliches NaBr hineingeschüttet und aufgelöst. Wird die Lösung wärmer oder kälter?
4. In eine einmolare wässrige KNO_3-Lösung wird noch etwas zusätzliches KNO_3 hineingeschüttet und aufgelöst. Wird die Lösung wärmer oder kälter?

27 RELATIVISTISCHE PHYSIK

27.1 Masse gleich Energie

Die folgende Geschichte stimmt nicht ganz mit der Wirklichkeit überein. Trotzdem kann man etwas aus ihr lernen.

Kolumbus und seine Leute sehen Land, sie legen an und stellen fest, dass sie sich in einem sehr schönen, fruchtbaren Land mit vielen Bäumen und Blumen befinden. Man vermutet, dass es sich um eine Insel handelt, und man nennt das Land Florida. Nach längerer Erforschung bemerkt man allerdings, dass das Land keinerlei Bodenschätze zu haben scheint.

Auf einer zweiten Reise entdeckt Kolumbus wieder ein Land, und auch von diesem wird vermutet, dass es eine Insel ist. Das neu entdeckte Land scheint nur aus Wüste zu bestehen. Es wächst dort gar nichts. Das Land ist allerdings, so stellt man bald fest, sehr reich an Bodenschätzen. Wegen der schönen Farbe seiner Felsen nennt man es Colorado.

Einige Jahre später fährt Vespucci in die Gegend, in der Florida und Colorado liegen, und macht eine überraschende Entdeckung: Es handelt sich bei den beiden Ländern um ein und dieselbe Insel. Kolumbus hatte sich ihr nur von zwei verschiedenen Seiten genähert.

Dies ist das Ende der Geschichte. Sie wurde nur erzählt, um dir etwas klar zu machen, was sich auch in der Physik abgespielt hat. Es ist mehrere Male passiert, dass man ein und dieselbe Sache zweimal entdeckt hat, ohne zunächst zu bemerken, dass es sich um dieselbe Sache handelt. Ein Beispiel hierfür wird uns im Folgenden beschäftigen.

Du kennst die beiden physikalischen Größen Masse und Energie. Eine davon, die Masse, war als Gewicht schon im Altertum bekannt. Die andere, die Energie, wurde um 1850 von Joule, Mayer und Helmholtz eingeführt. Gut 50 Jahre später, im Jahr 1905, entdeckte Einstein, dass es sich bei den beiden um dieselbe Größe handelt. Masse und Energie sind nur zwei verschiedene Namen für ein und dieselbe physikalische Größe.

Da man Masse und Energie zunächst für verschiedene Größen hielt, hatte man natürlich auch verschiedene Maßeinheiten eingeführt.

Seit Einstein 1905 seine „Relativitätstheorie" veröffentlicht hat, wissen wir, dass zwischen der Masse m und der Energie E die folgende Beziehung gilt:

$$E = k \cdot m$$

wobei

$$k = 9 \cdot 10^{16}\ \text{J/kg}$$

eine Konstante ist.

Als man in unserer Erzählung entdeckt hatte, dass Florida dieselbe Insel ist wie Colorado, wusste man zweierlei:

- Auf der Insel, die man bisher unter dem Namen Colorado gekannt hatte, kann man auch Landwirtschaft betreiben.

- Auf der Insel, die man zunächst unter dem Namen Florida gekannt hatte, gibt es auch Bodenschätze.

Auch als man entdeckt hatte, dass die Masse dieselbe Größe ist wie die Energie, wusste man zweierlei:

- Die Größe, die man früher Energie genannt hatte, muss auch die Eigenschaften der Masse haben: Energie muss Gewicht haben, und Energie muss Trägheit haben.
- Die Größe, die man früher Masse genannt hatte, muss auch die Eigenschaften der Energie haben. So muss man mit Masse etwas antreiben oder erwärmen können.

Dies sind erstaunliche, ja fast unglaubliche Aussagen der Relativitätstheorie. Wir werden in den nächsten Abschnitten sehen, welche Konsequenzen sie haben, und wir werden sehen, warum sie bis 1905 niemandem aufgefallen waren.

> Masse und Energie sind dieselbe physikalische Größe.

27.2 Energie hat die Eigenschaften von Masse

Nach Einsteins Entdeckung hat die Energie Gewicht. Wie viel Joule einem Kilogramm entsprechen, sagt uns die Gleichung

$$E = k \cdot m .$$

Nach dieser Behauptung müsste zum Beispiel, Abb. 27.1:

- eine Batterie, wenn sie voll ist, schwerer sein als wenn sie leer ist;
- ein Auto, wenn es schnell fährt, schwerer sein als wenn es langsam fährt oder als wenn es steht;
- das Wasser in einem Eimer, wenn es warm ist, schwerer sein als wenn es kalt ist.

Warum man hiervon gewöhnlich nichts merkt, siehst du sofort, wenn du nachrechnest, um wie

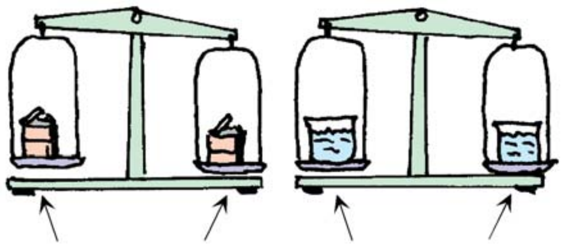


Abb. 27.1 Eine volle Batterie ist schwerer als eine leere, warmes Wasser ist schwerer als kaltes.

viel sich die Masse der genannten Gegenstände ändert.

Wir betrachten als Beispiel eine Monozelle. Beim Entladen gibt eine Monozelle eine Energiemenge von etwa 10 kJ ab. Um wie viel wird sie dabei leichter?

Wir berechnen

$$m = \frac{E}{k} = \frac{10\ \text{kJ}}{9 \cdot 10^{16}\ \text{J/kg}} = 1{,}1 \cdot 10^{-13}\ \text{kg} .$$

Die Masse der Batterie wird also um einen Betrag geringer, der kleiner ist als die Masse eines Staubkörnchens. (Ein typisches Staubkörnchen wiegt etwa 10^{-12} kg.) Und das kann man mit keiner normalen Waage feststellen.

Ähnlich kleine Werte findet man für den Massenunterschied zwischen einem langsamen und einem schnellen Auto oder zwischen dem kalten und dem warmen Wasser.

Gibt es aber überhaupt eine Situation, bei der man die Massenänderung bemerkt? Andernfalls wäre die Behauptung ja gar nicht beweisbar. Es gibt solche Situationen: etwa wenn man einen Körper mit sehr viel Impuls lädt.

Du weißt, dass die Energie eines Körpers zunimmt, wenn man ihn mit Impuls lädt. In Abb. 27.2 ist der Zusammenhang zwischen Energie und Impuls für einen beliebigen Körper dargestellt, so wie es von der Relativitätstheorie behauptet wird. Da Energie und Masse dasselbe ist, ist dies gleichzeitig der Zusammenhang zwischen Masse und Impuls. Die Masse, die der Körper hat wenn er ruht, d. h., wenn er noch keinen Impuls hat, ist in Abb. 27.2 mit m_0 bezeichnet. Wenn der Impuls zunimmt, nimmt auch die Masse zu, der Körper wird schwerer und träger.

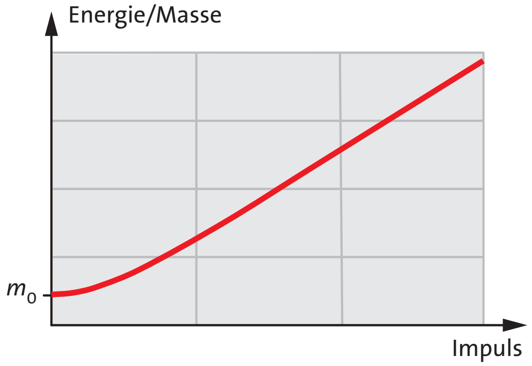


Abb. 27.2 Zusammenhang zwischen Energie und Impuls. Gleichzeitig Zusammenhang zwischen Masse und Impuls.

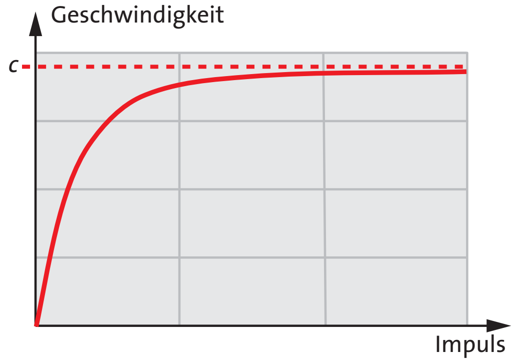


Abb. 27.3 Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Impuls. Für große Impulswerte nähert sich die Geschwindigkeit eines Körpers der Grenzgeschwindigkeit *c*.

Man nennt die Masse m_0, die der Körper im Ruhezustand hat, seine Ruhmasse.

Eine deutliche Zunahme der Masse eines Körpers findet in einem Teilchenbeschleuniger statt.

Ein Teilchenbeschleuniger ist eine sehr große Anlage, die ähnlich funktioniert wie eine Fernsehröhre. In der Fernsehröhre werden Elektronen mit Impuls geladen, sodass sie einen Strahl bilden.

Auch in einem Teilchenbeschleuniger werden Elektronen oder andere Teilchen mit Impuls geladen. Der Unterschied zur Fernsehröhre: Der Impuls, den man den Teilchen mitgibt, hat viel größere Werte. Wenn man zwei solcher Teilchenstrahlen gegeneinander richtet, entstehen beim Zusammenstoß neue Teilchen. Aus einer solchen Reaktion lernt man sehr viel über den Aufbau der Materie.

Das Beschleunigen der Teilchen geht sehr schnell. Wir wollen es aber in Gedanken langsam ablaufen lassen. Die Elektronen werden im Beschleuniger gleichmäßig mit Impuls geladen. Wie nicht anders zu erwarten, werden sie dabei zunächst schneller. Bei weiterer Impulszufuhr stellt man aber fest, dass die Geschwindigkeit immer weniger zunimmt. Schließlich ändert sie sich gar nicht mehr, obwohl man immer noch mehr Impuls auf die Elektronen überträgt. Abb. 27.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Impuls.

Woran kann es liegen, dass die Geschwindigkeit nicht weiterwächst? Die Erklärung liefert Abb. 27.2. Beim Laden der Teilchen mit Impuls nimmt die Masse zu. Dadurch werden die Teilchen immer träger, das heißt, es wird immer schwerer, ihre Geschwindigkeit zu ändern. Schließlich wird die Masse so groß, dass sich ihre Geschwindigkeit praktisch gar nicht mehr erhöhen lässt.

Die Geschwindigkeit der Teilchen nähert sich also einem Grenzwert, der nicht überschritten werden kann. Diese Grenzgeschwindigkeit beträgt

$$c = 300\,000 \text{ km/s}.$$

Es ist dieselbe Geschwindigkeit, mit der sich das Licht bewegt. Man kann also die Elektronen nicht schneller machen als das Licht.

Die Grenzgeschwindigkeit hat auch für alle anderen Körper diesen Wert. Auch ein Auto, ein Flugzeug oder eine Rakete können diese Geschwindigkeit nicht überschreiten. (Natürlich kann ein Auto oder ein Flugzeug aus noch anderen Gründen diese Geschwindigkeit nicht erreichen.)

> Kein Körper kann sich schneller bewegen als das Licht.

Die Konstante k in der Gleichung

$$E = k \cdot m$$

ist übrigens gerade gleich dem Quadrat der Grenzgeschwindigkeit c. Wir können die Gleichung daher auch schreiben in der Form

$$E = m \cdot c^2.$$

Aufgaben

1. Um ein Auto auf 100 km/h zu beschleunigen, braucht man eine Energiemenge von etwa 500 kJ. Um wie viel wird das Auto dadurch schwerer? Beim Beschleunigen verliert das Auto gleichzeitig Masse, weil es Benzin verbraucht. Schätze ab, ob das Auto insgesamt schwerer oder leichter wird.
2. Das Sonnenlicht, das pro Sekunde auf einen Quadratmeter (senkrecht zu den Sonnenstrahlen) fällt, transportiert eine Energiemenge von etwa 1000 Joule. Wie schwer ist die entsprechende Lichtmenge? (Licht hat keine Ruhmasse.) Wie lange müsste man warten, bis auf den Quadratmeter 1 Gramm Licht gefallen ist?
3. Ein Sprengstoff ist ein Stoff, der von selbst in andere Stoffe zerfallen kann. Sein chemisches Potenzial ist höher als das der Zerfallsprodukte. Was kann man über den Widerstand der Reaktion sagen?

27.3 Masse hat die Eigenschaften von Energie

Wenn Masse dasselbe ist wie Energie, so müsste man doch auch mit Masse all die nützlichen Dinge anstellen können, für die man Energie verwendet. Man müsste mit einem beliebigen Stoff Fahrzeuge und Maschinen antreiben können, und man müsste damit Häuser heizen können. Der Stoff brauchte nicht ein spezieller Brennstoff oder Treibstoff zu sein. Es müsste genügen, dass er Masse hat – und die hat schließlich jeder Stoff.

Man müsste also zum Beispiel Sand als Treibstoff benutzen können. Wir wollen nachrechnen, wie viel Sand man braucht, um ein Auto anzutreiben.

Die Gleichung

$$E = k \cdot m$$

sagt uns, dass 1 kg Sand (oder 1 kg eines beliebigen anderen Stoffes) die Energiemenge

$$E = 9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{J/kg} \cdot 1\ \mathrm{kg} = 9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{J}.$$

enthält. Beim Verbrennen in einem gewöhnlichen Motor gewinnt man aus 1 kg Benzin $4{,}3 \cdot 10^7$ J. Dem Kilogramm Sand entspricht eine zwei Milliarden mal größere Energiemenge, denn

$$2\,000\,000\,000 \cdot 4{,}3 \cdot 10^7\ \mathrm{J} \approx 9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{J}.$$

Ist das denn möglich? Muss hier nicht ein Fehlschluss vorliegen?

Tatsächlich ist die Rechnung richtig. Falsch ist nur der Schluss, dass man mit dem Sand ein Auto antreiben kann. Dass Energie nicht immer brauchbar ist, um etwas anzutreiben, ist schließlich eine ganz normale Tatsache.

Ein Beispiel, das dir sicher sofort einleuchtet: Um ein Haus zu heizen, reicht es nicht aus, dass man genügend Heizöl hat. Man braucht außerdem noch Sauerstoff für die Verbrennung des Heizöls. Gäbe es keinen Sauerstoff, so wäre das Heizöl wertlos. Wir wären nicht imstande, die Energie auf einen anderen Träger umzuladen – und darauf kommt es an. Wir brauchen also außer dem Heizöl noch einen geeigneten Reaktionspartner.

Ganz ähnlich verhält es sich mit den riesigen Energiemengen, die jeder Stoff aufgrund seiner Masse enthält. Auch um diese Energie zu nutzen, um sie auf einen anderen Energieträger umzuladen, braucht man einen geeigneten Reaktionspartner.

Der Reaktionspartner, den man hier braucht, ist so genannte Antimaterie. Antimaterie ist eine Form der Materie, die in der Natur nicht existiert.

Man kann Antimaterie künstlich herstellen, braucht dazu aber sehr viel Energie: genauso viel Energie wie es der Masse der hergestellten Antimaterie entspricht. Man gewinnt also dabei nichts.

Es ist außerdem praktisch unmöglich, Antimaterie länger als Bruchteile einer Sekunde aufzubewahren. Sie reagiert sehr, sehr schnell mit gewöhnlicher Materie.

Es gab Spekulationen, ob Teile des Weltalls, die weit von uns entfernt sind, aus Antimaterie bestehen. Diese Vermutungen haben sich aber bisher nicht bestätigt.

28 WELLEN

Sie sind jedem bekannt vom Wasser, Abb. 28.1: eine Art Verformung der Wasseroberfläche, die sich von selbst bewegt.

Abb. 28.1 Wasserwelle

Eine andere Wellenerscheinung ist der Schall: sehr kleine Verschiebungen der Luft, die sich durch die Luft hindurchbewegen.

Wasser- und Schallwellen sind so interessant, dass es Grund genug wäre, sich mit Wellen eingehender zu beschäftigen.

Tatsächlich haben aber Wellen in der Naturwissenschaft eine noch viel größere Bedeutung, denn viele Erscheinungen, von denen man es von vornherein gar nicht vermuten würde, lassen sich als Wellen deuten.

Da gibt es zunächst die große Klasse der so genannten elektromagnetischen Wellen. Hierzu gehören die Wellen, die man zu Rundfunk-, Fernseh- und Handyübertragung benutzt. Außerdem die „Mikrowellen", die im Mikrowellenherd Anwendung finden. Dann eine ganze Reihe von Erscheinungen, die man Strahlungen nennt: Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung, und schließlich das uns allen vertraute Licht. Wir werden später sehen, was alle diese verschiedenen Typen elektromagnetischer Strahlung gemeinsam haben. Und wir werden uns mit der Frage befassen, welches hier das Medium ist, in dem sich diese Wellen bewegen. Wenn wir diese Wellen mit Wasserwellen vergleichen: Was entspricht dem Wasser und was entspricht der Verformung des Wassers?

Du wirst nun verstehen, dass es lohnt, sich mit Wellen zu beschäftigen.

Bei unserer Aufzählung der verschiedenen Wellenphänomene ist es dir vielleicht aufgefallen, dass einige der Wellen zur Datenübertragung benutzt werden. Schall, Licht und Radiowellen treten in der Natur und in der Technik als Datenträger auf. Aber auch andere Wellenarten oder „Strahlungen" werden als Datenträger verwendet. Vielleicht hast du schon von Infrarotkameras gehört. Und dass man Röntgenstrahlen benutzt, um in den menschlichen Körper hineinzuschauen, d. h., um Daten aus dem menschlichen Körper herauszubringen, weißt du sicher auch.

28.1 Der Träger der Wellen

Wir beginnen unsere Untersuchung mit einem besonders einfachen Repräsentanten der Wellen: mit „Seilwellen".

Ein langes Seil wird auf den Boden gelegt, und das eine Ende wird kurz und kräftig nach oben und sofort wieder nach unten bewegt. Von dem Ende, das man bewegt hat, läuft eine Welle weg. Abb. 28.2 zeigt drei Momentaufnahmen.

Als Welle bezeichnen wir also die Verformung, die über das Seil läuft. Es ist selbstverständlich,

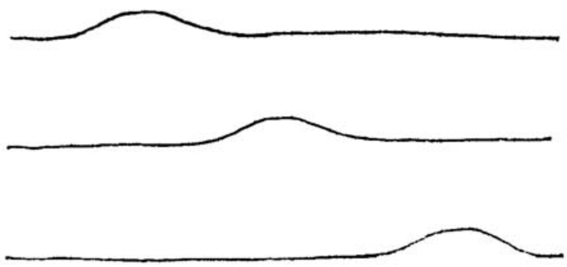


Abb. 28.2 Drei Momentaufnahmen einer Seilwelle

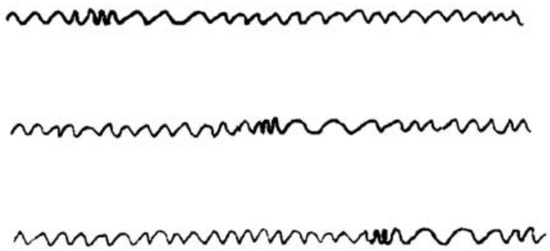


Abb. 28.4 Drei Momentaufnahmen einer Längswelle in einer Stahlfeder

dass wir ohne Seil keine Seilwelle erzeugen können.

Wir verallgemeinern: Damit eine Welle existieren kann, muss es ein Gebilde geben, in dem die Welle läuft. Wir nennen dieses Gebilde den Träger der Welle (in unserem Fall ist das Seil der Träger). Der Träger befindet sich zunächst in seinem Grundzustand (das Seil liegt gerade gestreckt auf dem Boden). Eine „Quelle“, die an einer bestimmten Stelle sitzt, macht dann für kurze Zeit eine Veränderung des Grundzustandes (eine Person bewegt das Seil an einer Stelle kurz auf und ab). Diese Veränderung des Grundzustandes läuft durch den Träger hindurch.

Wir betrachten unter diesen Gesichtspunkten eine zweite Wellenart: eine Wasserwelle in einer langen Rinne. Träger der Welle ist das Wasser. Im Grundzustand ist die Wasseroberfläche überall waagrecht, Abb. 28.3a.

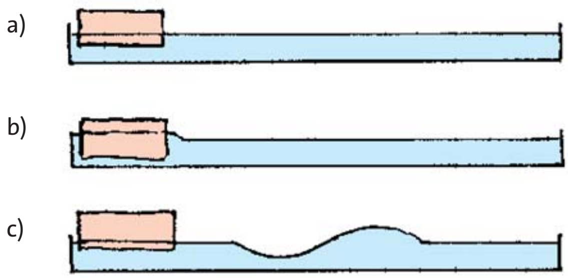


Abb. 28.3 Der Körper, der im Wasser schwimmt, wird kurz nach unten gedrückt und wieder hochgezogen.

Wir tauchen einen Körper am einen Ende der Rinne kurz in das Wasser ein, Abb. 28.3b, und ziehen ihn wieder heraus. Dadurch bildet sich eine Abweichung vom Grundzustand: An der Wasseroberfläche entsteht ein Buckel, und dieser läuft von der Quelle weg, Abb. 28.3c.

Ein drittes Beispiel einer Welle zeigt Abb. 28.4. Der Träger der Welle ist eine lange, etwas vorgespannte Stahlfeder. Die Änderung des Grundzustandes: Das eine Ende der Feder wird schnell ein Stück nach links und gleich wieder zurück an seine alte Stelle bewegt. Auch diese Störung des Grundzustandes läuft selbständig von der Quelle weg.

> Eine Welle braucht einen Träger. An einem Ort, an der Quelle, wird der Grundzustand des Trägers schnell verändert. Diese Abweichung vom Grundzustand läuft selbständig von der Quelle weg.

In allen Beispielen, die wir betrachtet haben, bewegte sich außer der Welle noch der Wellenträger. Halte diese beiden Bewegungen gut auseinander!

Manchmal ist die Bewegung des Wellenträgers quer zur Bewegungsrichtung der Welle: bei der Seilwelle zum Beispiel. Solche Wellen nennt man Querwellen.

Manchmal geschieht die Hin- und Herbewegung des Wellenträgers in derselben Richtung wie die Wellenbewegung: bei der Welle in der Stahlfeder zum Beispiel. Solche Wellen heißen Längswellen.

Manchmal ist die Bewegung des Trägers komplizierter. Bei einer Wasserwelle zum Beispiel bewegt sich der Träger, d. h. das Wasser, auf einer geschlossenen Kurve.

Und manchmal bewegt sich auch gar nichts, etwa bei den elektromagnetischen Wellen.

> Verwechsle nicht die Bewegung der Welle mit der Bewegung des Wellenträgers.

28.2 Energietransport mit Wellen

Wir betrachten ein konkretes Beispiel: die Wasserwelle, Abb. 28.3.

Wir drücken den schwimmenden Körper am einen Ende sehr, sehr langsam hinunter. Dabei steigt der Wasserspiegel in der ganzen Rinne. Zum Hinunterdrücken braucht man etwas Energie. Wir lassen dann den Körper wieder sehr, sehr langsam aufsteigen. Dabei sinkt der Wasserspiegel, und wir bekommen die vorher ins Wasser hineingesteckte Energie wieder heraus. Bei dem Vorgang ist keine Welle entstanden. Wir wiederholen nun das Eintauchen und Wiederhochlassen, diesmal allerdings sehr schnell. Man muss beim Hinunterdrücken mehr Energie aufwenden als beim ersten Mal und bekommt sie nicht vollständig wieder zurück. Ein Teil der Energie läuft mit der Welle weg. Die Welle transportiert Energie.

Man kann diese Energie an einem anderen Ort auffangen und sie benutzen, um etwas anzutreiben. Dass Wasserwellen Energie tragen, hast du möglicherweise schon selbst gespürt, wenn du am Meer bei Wellengang gebadet hast. Es gibt auch Kraftwerke – zunächst noch im Versuchsstadium –, die ihre Energie aus den Wellen des Meeres beziehen. Noch einmal zurück zu unserem Experiment. Wenn man den Schwimmkörper schnell bewegt, entsteht eine Welle, mit der Energie wegläuft. Bewegt man ihn sehr langsam, so entsteht (fast) keine Welle und es läuft somit auch (fast) keine Energie weg. In anderen Worten:

> Je schneller die Zustandsänderung am Ort der Quelle ist, desto mehr Energie trägt die Welle davon.

28.3 Die Geschwindigkeit von Wellen

Versuche einmal, eine Seilwelle schneller oder langsamer zu machen, indem du das Seilende auf unterschiedliche Arten bewegst. Alles, was du erreichst, ist, dass sich die Form der Welle oder die Größe der Verformung ändert. Auf die Geschwindigkeit hast du keinen Einfluss. Es ist anders, als wenn du einen Stein wegwirfst. Die Geschwindigkeit des Steins hängt davon ab, welchen Impuls er von der „Quelle“ mitbekommen hat. Wovon hängt aber die Geschwindigkeit einer Welle ab?

Die Antwort auf diese Frage ist eigentlich etwas verwickelt. Wir können sie aber wenigstens zum Teil geben:

> Die Geschwindigkeit einer Welle hängt vom Träger ab, in dem die Welle läuft.

So hat eine Welle auf der Oberfläche von Wasser eine andere Geschwindigkeit als an der Oberfläche von Alkohol, Benzin oder Quecksilber. Oder eine Welle in einer harten Feder läuft mit einer anderen Geschwindigkeit als in einer weichen. Schallwellen laufen in Luft mit etwa 300 m/s, in Wasser mit 1480 m/s. (Die Wasserwellen, die wir vorher betrachtet haben, sind keine Schallwellen. Schallwellen in Wasser kann man aber gut im Schwimmbad erzeugen: Man taucht, und stößt unter Wasser einen Schrei aus.)

Licht bewegt sich im so genannten leeren Raum – (Wir werden später sehen, dass der leere Raum gar nicht so leer ist.) – mit 300 000 km/s, in Glas dagegen mit nur 200000 km/s.

Aufgabe

1. Viele Dominosteine werden aufrecht nebeneinander gestellt. Wenn man den ersten umstößt, fällt er gegen den zweiten, sodass dieser auch umfällt usw. Durch die Reihe läuft also eine Veränderung des Zustandes der Dominosteine. Was hat dieser Vorgang mit einer Welle gemeinsam? Worin unterscheidet er sich von einer Welle?

28.4 Schwingungen

Um mit dem Thema „Wellen“ weiterzukommen, müssen wir etwas abschweifen und uns mit einer anderen Erscheinung beschäftigen: mit Schwingungen.

Wenn irgendeine physikalische Größe ihren Wert periodisch ändert, spricht man von einer Schwingung.

Das in Abb. 28.5 dargestellte Kind auf der Schaukel ändert periodisch seinen Ort, es führt eine Schwingung aus.

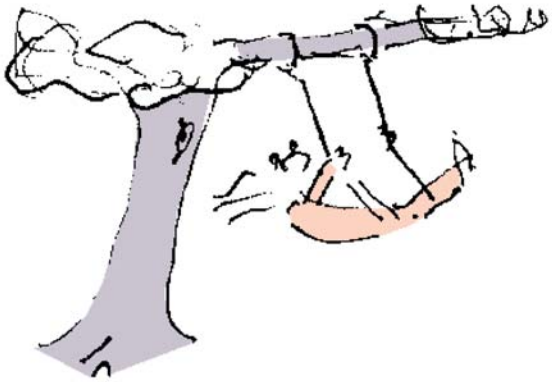


Abb. 28.5 Die Schaukel mit dem Kind führt eine Schwingung aus.

Drück das eine Ende eines Lineals fest auf die Tischplatte, bewege das andere Ende nach unten und lass es los. Das Lineal führt eine Schwingung aus, Abb. 28.6.

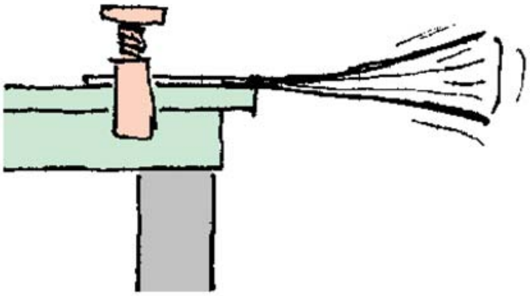


Abb. 28.6 Das Lineal führt eine Schwingung aus.

Abb. 28.7 zeigt einen Behälter, der so aufgehängt ist, dass er nach vorn umkippen kann. Aus dem Wasserhahn fließt ständig und gleichmäßig Wasser in den Behälter. Wenn der Wasserspiegel eine bestimmte Höhe erreicht, kippt der Behälter nach vorn um, und das Wasser fließt aus. Da er nun leer ist, kippt er wieder zurück und der Vorgang beginnt von vorn. Der Behälter führt also eine Schwingung aus.

Eine Schwingung soll graphisch dargestellt werden. Wir tragen dazu den Wert der Größe, die sich periodisch ändert, über der Zeit auf. In Abb. 28.8 ist die Masse des Wassers in dem Behälter von Abb. 28.7 als Funktion der Zeit aufgetragen. Die Wassermasse nimmt zuerst gleichmäßig zu. Sobald der Behälter umkippt, nimmt sie sehr schnell ab, um dann wieder gleichmäßig zuzunehmen usw.

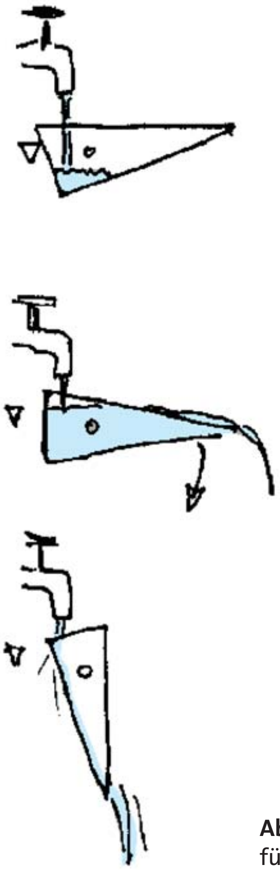


Abb. 28.7 Der Wasserbehälter führt eine Schwingung aus.

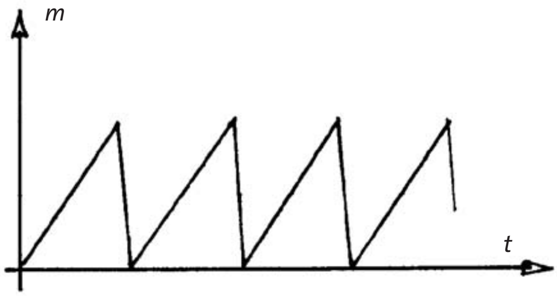


Abb. 28.8 Masse des Wassers im Behälter von Abb. 28.7 als Funktion der Zeit

Einen besonders wichtigen Schwingungstyp stellen die Sinusschwingungen dar. Bei ihnen ändert sich die betrachtete physikalische Größe gemäß einer so genannten Sinusfunktion. Das rechte Ende des Lineals in Abb. 28.6 zum Beispiel führt eine Sinusschwingung aus. In Abb. 28.9 ist der Ort x dieses Endes als Funktion der Zeit aufgetragen.

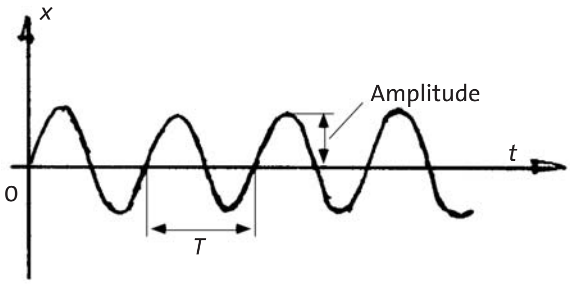


Abb. 28.9 Der Ort x des rechten Endes des Lineals von Abb. 28.6 als Funktion der Zeit

Wie die Sinusfunktion definiert ist, wirst du im Mathematikunterricht lernen. Für unsere Zwecke genügt es zu wissen, dass es sich dabei um eine sehr glatte Schwingung handelt, eine Schwingung ohne Ruck und ohne plötzliche Richtungsänderungen.

Die Werte der Sinusfunktion kannst du dir übrigens mit dem Taschenrechner beschaffen.

Die Zeit, die ein schwingendes Gebilde braucht, um von einem beliebigen Ausgangszustand ausgehend in diesen Zustand zum ersten Mal zurückzukehren, nennt man die Schwingungsdauer. Man bezeichnet sie mit T.

Wenn man sagt, für das schwingende Lineal gelte

$$T = 0{,}2\ \mathrm{s},$$

so meint man, für eine vollständige Auf- und Abbewegung, vom unteren Umkehrpunkt aus gerechnet, braucht das Lineal 0,2 s.

In Abb. 28.9 ist die Schwingungsdauer eingetragen.

Als Maß dafür, wie schnell etwas schwingt, benutzt man statt der Schwingungsdauer T auch oft die Frequenz f:

$$f = \frac{1}{T}$$

gibt an, wie viele Schwingungsperioden pro Sekunde stattfinden.

Ist z.B. die Schwingungszeit

$$T = 0{,}5\ \mathrm{s},$$

so wird

$$f = \frac{1}{0{,}5\ \mathrm{s}} = 2\frac{1}{\mathrm{s}}.$$

d. h. zwei Schwingungen pro Sekunde. Logisch: Eine Schwingung braucht ja gerade eine halbe Sekunde.

Die Maßeinheit 1/s, oder „pro Sekunde" heißt auch Hertz, abgekürzt Hz. Wir haben also in unserem Beispiel

$$f = 2\ \mathrm{Hz}.$$

Die maximale Auslenkung einer Sinusschwingung nennt man ihre Amplitude, Abb. 28.9.

Aufgaben

1. Nenne Beispiele für Schwingungsvorgänge. Welche physikalische Größe ändert dabei ihren Wert periodisch?
2. In mechanischen Uhren führt die so genannte Unruhe Schwingungen aus und verursacht das Tick-Tack-Geräusch. Falls ihr zu Hause einen mechanischen Wecker habt: Miss die Dauer von 10 Schwingungen des Weckers mithilfe einer anderen Uhr, die einen Sekundenzeiger hat. Wie groß ist die Schwingungsdauer des Weckers? Wie groß ist die Frequenz?
3. Hänge einen Gegenstand an einem 1,50 m langen Faden auf, versetze ihn in Schwingungen und miss die Schwingungsdauer. Ersetze den Gegenstand durch einen anderen, schwereren und miss die Schwingungsdauer wieder. Vergleiche.

28.5 Sinuswellen

Zurück zu den Wellen.

Es genügt uns nicht, dass eine einzige Welle über das Wasser läuft. Wir möchten, dass der Transportvorgang andauert. Was können wir tun? Nun, einfach mehrere oder viele Wellen losschicken, einen Wellenzug. Wenn ein Wellenzug von der Quelle weglaufen soll, genügt es nicht, dass der Körper, der die Wellen erzeugt, einmal auf- und abbewegt wird. Wir müssen ihn immer wieder, d. h. periodisch, auf- und abbewegen. Die Quelle muss eine Schwingung ausführen.

In unseren Beispielen hat der Sender irgendeine Bewegung ausführen müssen, um eine Welle auf den Weg zu schicken: Für eine Wasserwelle eine Auf- und Abbewegung, für die Welle in der Stahlfeder eine Hin- und Herbewegung. Um eine periodische Welle zu erzeugen, muss diese Bewegung eine Schwingungsbewegung sein.

Wenn nun die Quelle einer Welle eine Sinusschwingung ausführt, so entsteht eine Sinuswelle.

Eine Sinuswelle in einem Seil kann man leicht erkennen. Eine Momentaufnahme des Seils hat nämlich gerade wieder die Form der Sinusfunktion, Abb. 28.10.

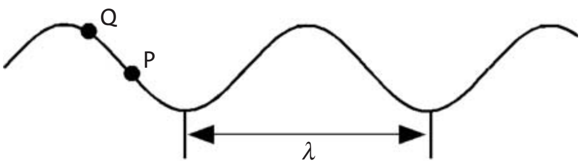


Abb. 28.10 Momentaufnahme eines Seils, durch das eine Sinuswelle läuft

Wir stellen uns nun vor, wir machen kurz nacheinander mehrere Momentaufnahmen des Seils, Abb. 28.11. Das erste Bild zeigt einen sinusförmigen Verlauf, das zweite auch, das dritte auch usw. Aber alle Bilder sind gegeneinander verschoben. Die ganze Sinusfunktion ist also nach rechts gewandert.

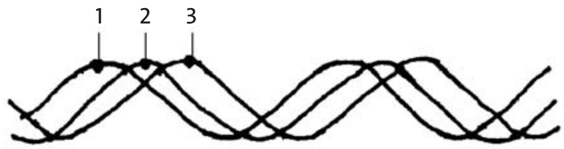


Abb. 28.11 Drei Momentaufnahmen einer Sinuswelle in kurzen zeitlichen Abständen

Wir machen nun eine Momentaufnahme einer Sinus-Längswelle, einer Sinuswelle in einer Stahlfeder zum Beispiel, Abb. 28.12. Hier sieht man zunächst keinen sinusförmigen Verlauf. Wenn man aber die Verschiebung jedes Punktes der Feder gegenüber seiner Lage im Grundzustand abliest, und über dem Ort aufträgt, an dem sich der Punkt im Grundzustand befindet, so erhält man wieder das Bild einer Sinusfunktion.

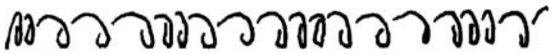


Abb. 28.12 Momentaufnahme einer sinusförmigen Längswelle

In Abb. 28.10 ist der Abstand zwischen zwei benachbarten „Wellentälern" markiert. Man nennt diesen Abstand die Wellenlänge und bezeichnet ihn mit dem griechischen Buchstaben Lambda: λ. Der Abstand zwischen zwei benachbarten „Wellenbergen" ist natürlich auch gleich λ.

Damit eine Sinuswelle durch ein Seil läuft, muss der Anfang des Seils eine Sinusschwingung ausführen. Wenn im Seil eine Sinuswelle läuft, macht aber nicht nur der Anfang des Seils eine Sinusschwingung, sondern jeder andere Teil auch. Der Punkt P in Abb. 28.10 schwingt sinusförmig auf und ab, und ebenso der Punkt Q. Allerdings sind die Schwingungen der beiden Punkte zeitlich gegeneinander versetzt.

Aufgaben

1. Stelle die Verschiebung eines Punktes auf einem Seil, durch das eine Welle läuft, als Funktion der Zeit dar. Trage in dasselbe Koordinatensystem die Verschiebung eines benachbarten Punktes des Seiles ein.
2. Wasserwellen auf dem Meer oder auf einem Teich sind manchmal nahezu sinusförmig. Welche Wellenlängen kann man antreffen?

28.6 Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge

Wir schauen uns an, wie die Wellenberge und -täler aus der Quelle herauskommen: Pro Schwingungsdauer T kommt gerade ein vollständiger Wellenberg plus ein vollständiges Wellental aus der Quelle heraus: ein Stück Welle der Länge λ. Das bedeutet, dass sich die ganze Welle in der Zeit T um λ vorwärts bewegt. Damit können wir die Geschwindigkeit der Welle angeben. Da die Geschwindigkeit gleich dem zurückgelegten Weg dividiert durch die dazu gebrauchte Zeit ist, wird

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Wir ersetzen hier noch die Schwingungsdauer T durch die Frequenz f. Mit $T = 1/f$ wird

$$v = \lambda \cdot f.$$

Ein Beispiel: Wenn eine Welle die Wellenlänge λ = 2 m hat, und jeder Teil des Wellenträgers mit der Frequenz 4 Hz schwingt, so ergibt sich für die Geschwindigkeit der Welle

$$v = 2\,\mathrm{m} \cdot 4\,\mathrm{Hz} = 2\,\mathrm{m} \cdot 4/\mathrm{s} = 8\,\mathrm{m/s}.$$

Aufgaben

1. Die Geschwindigkeit von Schallwellen in Luft beträgt etwa 300 m/s. Welches ist die Wellenlänge der Welle, die dem Kammerton a entspricht? Der Kammerton hat eine Frequenz von 440 Hz.
2. Radiowellen haben eine Geschwindigkeit von v = 300 000 km/s.
   Ein Sender sendet mit einer Frequenz von 98,4 MHz. Welche Wellenlänge haben die Wellen?

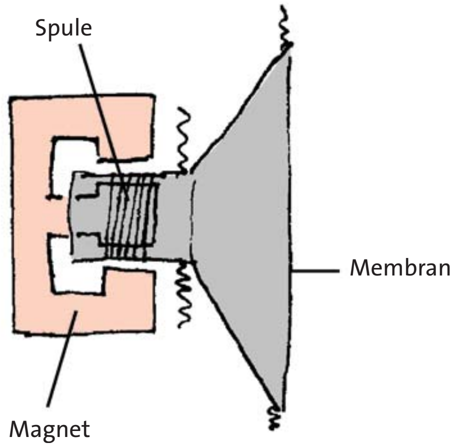


Abb. 28.13 Aufbau eines Lautsprechers

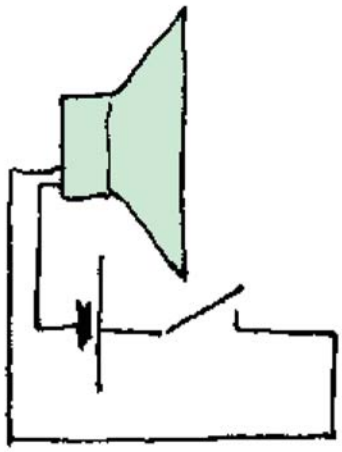


Abb. 28.14 Beim Schließen und beim Öffnen des Schalters hört man einen Knacklaut.

28.7 Schallwellen

Der Träger der Schallwellen ist die Luft. Da man Luft nicht sehen kann, kann man auch die Schallwellen nicht sehen. Dass es sich bei Schall um Wellen in der Luft handeln muss, sieht man aber gut, wenn man die Entstehung von Schall im Lautsprecher betrachtet. Man braucht einen Lautsprecher, dessen „Membran" man sehen kann, einen Lautsprecher ohne Gehäuse am besten.

Abb. 28.13 zeigt, wie ein Lautsprecher aufgebaut ist. Die Membran ist so aufgehängt, dass sie senkrecht zum Lautsprecher verschiebbar ist. Hinten an der Membran ist eine Spule befestigt. Die Spule taucht in einen Dauermagneten ein. Der eine Pol des Magneten befindet sich an der Außenseite des inneren Magnetteils, der andere an der Innenseite des äußeren Teils. Fließt durch die Spule ein elektrischer Strom, so wird sie vom Magnetfeld nach vorn oder hinten gedrückt – je nach Richtung des elektrischen Stroms. Dabei wird die ganze Membran mitbewegt.

Wir schließen den Lautsprecher über einen Schalter an eine Batterie an, Abb. 28.14. Schließt man nun den Schalter, so hört man ein Knackgeräusch. Und öffnet man den Schalter, so hört man wieder einen Knack. Beim Einschalten sieht man auch, wie sich die Membran aus ihrer anfänglichen Ruhelage herausbewegt, und beim Ausschalten, wie sie sich wieder zurückbewegt.

Die schnelle Verschiebung der Membran bewirkt eine schnelle Verschiebung der Luft dicht vor der Membran. Und diese Verschiebung löst sich vom Lautsprecher und läuft weg. Die sich bewegende Verschiebung der Luft ist eine Schallwelle.

Die Luft bewegt sich in derselben Richtung hin und her, in der die Schallwelle läuft. Schall ist also eine Längswelle. Dass der Träger des Schalls die Luft sein muss, zeigt noch ein anderer, einfacher Versuch, Abb. 28.15. Eine Klingel wird an eine Batterie angeschlossen und unter eine Glasglocke gelegt. Während die Klingel läutet, wird die Luft

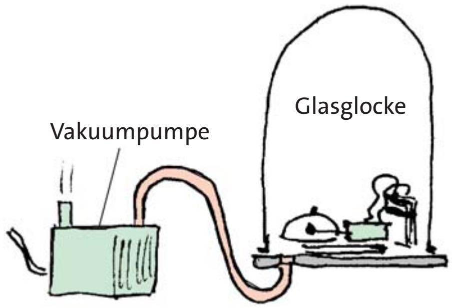


Abb. 28.15 Wenn in der Glasglocke keine Luft mehr ist, hört man die Klingel (fast) nicht mehr.

aus der Glocke herausgepumpt. Beim Pumpen wird der Ton immer leiser und leiser, bis man ihn schließlich fast nicht mehr hört. Lässt man die Luft wieder einströmen, so wird der Klingelton wieder laut. Dass man trotz fehlender Luft doch noch etwas hört, liegt daran, dass der Schall auch durch feste Stoffe transportiert wird: hier durch die Unterlage der Klingel.

> Schall ist eine Längswelle. Träger der Schallwellen ist gewöhnlich die Luft.

Wir schließen einen Lautsprecher an eine Spannungsquelle an, die die Spannung periodisch ein- und ausschaltet. Abb. 28.16 zeigt den Verlauf der Spannung als Funktion der Zeit. Die Spannungsquelle soll so beschaffen sein, dass man die Frequenz verändern kann. Wir wählen zunächst eine sehr niedrige Frequenz: etwa 1 Hz. Man hört pro Sekunde zwei Knackgeräusche: einen Knack bei jedem Einschalten und einen bei jedem Ausschalten.

Abb. 28.16 „Rechteckspannung“

Wir drehen nun die Frequenz langsam hoch. Die Knacklaute kommen in immer schnellerer Folge. Wenn man etwa 20 Hz erreicht hat, schafft es aber unser Gehör nicht mehr, die einzelnen Knackgeräusche getrennt voneinander wahrzunehmen. Was man hört, ist ein Ton, eine dauernde, gleich bleibende Empfindung.

Der Ton, den man wahrnimmt, ist ein tiefer Ton. Erhöht man die Frequenz weiter, so wird der Ton höher.

Statt einer „Rechteckspannung“ legen wir nun eine Sinusspannung an den Lautsprecher. Wieder beginnen wir mit einer sehr niedrigen Frequenz. Diesmal hören wir aber unterhalb 20 Hz gar nichts. Hierfür gibt es zwei Ursachen.

Zum einen entsteht bei sehr niedriger Frequenz gar keine Welle. Genauso wenig, wie auf einer Wasseroberfläche keine Wasserwelle entsteht, wenn man einen Gegenstand sehr langsam eintaucht. Zum anderen ist unser Gehör nur für Wellen in einem bestimmten Frequenzbereich empfindlich: etwa von 20 Hz bis 20 000 Hz. Mit dem Älterwerden wird dieser Bereich auch noch deutlich kleiner.

> Unser Gehör ist für Sinuswellen mit Frequenzen von etwa 20 Hz bis 20 kHz empfindlich. Je höher die Frequenz, desto höher der Ton.

Wir messen die Geschwindigkeit einer Schallwelle, Abb. 28.17. Die Welle wird erzeugt, indem jemand in die Hände klatscht.

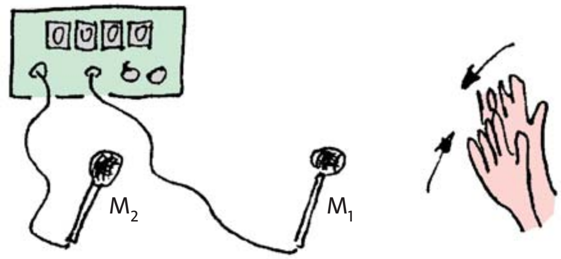


Abb. 28.17 Messung der Geschwindigkeit einer Schallwelle

Die Welle kommt nacheinander bei den Mikrophonen M_1 und M_2 vorbei. Die Mikrophone sind an eine elektronische Stoppuhr angeschlossen. Wenn ein Signal von M_1 kommt, läuft die Stoppuhr los; kommt ein Signal von M_2, so wird sie angehalten. Sie misst also die Zeit, die die Welle braucht, um die Strecke von M_1 bis M_2 zu durchlaufen. Die Geschwindigkeit der Welle erhält man, indem man den Abstand zwischen den Mikrophonen durch die Laufzeit dividiert. Die Messung ist nicht sehr genau. Mit einer genaueren Messmethode würde man feststellen, dass die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur abhängt. Merke dir als Näherungswert 300 m/s.

> Die Geschwindigkeit von Schallwellen in Luft beträgt etwa 300 m/s.

Aufgaben

1. Nenne verschiedene Quellen von Schallwellen.
2. Welche Frequenz hat ein Ton, dessen Wellenlänge 2 m beträgt?
3. Welche Wellenlängen gehören zum tiefsten und zum höchsten Ton, den man noch hören kann?
4. Mit zunehmender Lufttemperatur wächst die Schallgeschwindigkeit. Eine sinusförmige Schallwelle laufe aus einem Gebiet kalter in ein Gebiet warmer Luft. Was geschieht dabei mit ihrer Frequenz, was mit ihrer Wellenlänge?
5. Während eines Gewitters siehst du einen Blitz und hörst 10 Sekunden später den Donner. Wie weit ist das Gewitter von dir entfernt?

28.8 Elektromagnetische Wellen

Wir wollen eine elektromagnetische Welle erzeugen. Dazu orientieren wir uns an den Erzeugungsmethoden anderer Wellen: Man sorge dafür, dass sich der Zustand eines Trägers sehr schnell ändert. Wir beginnen mit einem Draht, durch den ein elektrischer Strom fließt. Der Draht ist, wie du weißt, von einem Magnetfeld umgeben. Der Zustand der Umgebung des Drahtes ist also verändert: Fließt kein Strom, so gibt es kein magnetisches Feld, fließt ein Strom, so ist ein Feld vorhanden, Abb. 28.18. Wir betrachten nun den

Abb. 28.18 Umgebung einer elektrischen Leitung in zwei verschiedenen Zuständen. Links: ohne magnetisches Feld; rechts: mit magnetischem Feld

Vorgang der Entstehung des Feldes in Zeitlupe: Wir drehen die Stromstärke von 0 A an langsam hoch. Je stärker der Strom, desto dichter das Feld. Dreht man die Stromstärke wieder herunter, so verschwindet das Feld wieder. Beim Hochdrehen der Stromstärke fließt Energie ins Feld. Beim Herunterdrehen kehrt die Energie in den Draht zurück und erzeugt dort Wärme.

Nun die Welle: Wir schalten den Strom sehr schnell ein, indem wir einen Schalter schließen. Die Zustandsänderung der Drahtumgebung ist nun sehr schnell. Sie löst sich vom Draht und läuft selbständig weg, Abb. 28.19. Die Zustandsänderung ist die Änderung eines Magnetfeldes. Was wegläuft ist also ein Magnetfeld. Diese „elektromagnetische“ Welle läuft während des Einschaltens weg. Wenn der Strom mit konstanter Stärke fließt, läuft nichts mehr weg.

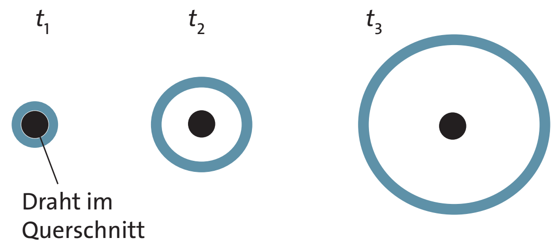


Abb. 28.19 Draht im Querschnitt zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Beim schnellen Einschalten des elektrischen Stroms läuft magnetisches Feld vom Draht weg.

Schaltet man den Strom (schnell) wieder aus, so hat man wieder eine schnelle Zustandsänderung, und wieder läuft eine elektromagnetische Welle weg.

Der Draht, in dem wir die Stromstärke schnell verändert haben, spielt die Rolle einer Sendeantenne.

> Schaltet man einen elektrischen Strom in einem Draht ein oder aus, so löst sich vom Draht eine elektromagnetische Welle.

Einen elektrischen Strom sehr schnell ein- und auszuschalten, ist allerdings gar nicht leicht. Benutzt man einen gewöhnlichen Schalter, so ist der Schaltvorgang für unsere Zwecke zu langsam: Beim ersten Berühren der Kontakte fließt zunächst ein sehr schwacher Strom, der dann erst

„langsam" ansteigt. Entsprechend fällt die Stromstärke beim Öffnen des Schalters auch nicht so schnell ab, wie wir es brauchen. Eine bessere Methode besteht darin, mithilfe einer sehr hohen Spannung einen Funkenüberschlag zu erzeugen. Dieser ist mit einer sehr, sehr schnellen Stromstärkeänderung verbunden.

Im Prinzip könnte man eine elektromagnetische Welle auf noch eine andere Art erzeugen: Man nimmt einen Dauermagneten und bewegt ihn sehr schnell. Auch dann ändert sich das Magnetfeld. Dieses Verfahren funktioniert nur deshalb sehr schlecht, weil man es nicht schafft, den Magneten schnell genug zu bewegen.

Woran kann man aber erkennen, ob man überhaupt eine Welle erzeugt hat? Man braucht eine Vorrichtung, die auf das Ankommen der Welle reagiert: eine Empfangsantenne. Die einfachste Methode: Wir schalten einen Radioapparat ein und stellen ihn auf Kurz-, Mittel- oder Langwelle (nur FM geht schlecht). Jedes Mal, wenn eine der von uns erzeugten Wellen ankommt, hören wir eine Störung, einen Knackton. Man kann das Ankommen der Welle auch sichtbar machen: An den Eingang eines Oszilloskops schließt man die beiden Enden eines Drahts, Abb. 28.20. Der Draht bildet eine Spule mit einer einzigen Windung. Das Ankommen der Welle bedeutet eine Änderung des Magnetfeldes in dieser Spule, und die Änderung eines Magnetfeldes in einer Spule verursacht eine Spannung zwischen den Enden der Spule. Wir hatten diesen Vorgang Induktion genannt. Da die Änderung in einer sehr kurzen Zeit geschieht, entsteht auch nur ein sehr kurzer „Spannungsstoß". Diesen sieht man auf dem Bildschirm des Oszilloskops.

Abb. 28.20 Die Drahtschleife ist die Empfangsantenne. In der Empfangsantenne wird durch die ankommende Welle eine Spannung induziert. Die Spannung wird vom Oszilloskop angezeigt.

Eine wichtige Frage ist noch offen: Worin läuft denn die elektromagnetische Welle eigentlich? Was ist der Träger? Die Luft kann es nicht sein: Elektromagnetische Wellen laufen auch durch den materiefreien Raum. Das Licht, das ja eine elektromagnetische Welle ist, durchläuft problemlos die 150 Millionen km von der Sonne zur Erde, einen Raum, der praktisch ganz frei ist von Luft und anderer Materie. (Die Lufthülle der Erde ist nur einige Kilometer dick.)

Man kann also schließen, dass der so genannte leere Raum etwas enthalten muss, was die Rolle des Trägers der elektromagnetischen Wellen spielt. Als man entdeckt hatte, dass Licht eine Welle ist, nannte man dieses Etwas den „Äther". Man glaubte aber zunächst, Licht sei eine mechanische Welle in diesem Äther, eine Welle, bei der sich der Träger bewegt — genauso wie sich bei Schallwellen die Luft bewegt. Erst viel später stellte man fest, dass die Zustandsänderung des Trägers der elektromagnetischen Wellen keine Verformung ist, und dass dieser Träger noch andere überraschende Eigenschaften hat.

Daraufhin gab man ihm einen neuen Namen, denn mit dem Namen „Äther" verbanden sich zu viele falsche Vorstellungen. Dieser neue Name ist: „Vakuum". Auf deutsch „das Leere".

> Den Träger der elektromagnetischen Wellen nennt man „Vakuum".

Man darf diesen Namen nicht falsch verstehen. „Das Leere" ist etwas anderes als „das Nichts". Wo „das Nichts" ist, ist nichts, gar nichts. In einem Behälter, der leer ist dagegen, kann sehr wohl noch etwas sein. In einer leeren Colaflasche ist zwar keine Cola mehr, aber es ist im Allgemeinen Luft darin. In einem leeren Kaugummiautomaten sind keine Kaugummis mehr, aber der ganze Mechanismus des Automaten ist noch drin. Und aus einer leeren Batterie kann man keine elektrische Energie herausholen, aber die Batterie ist noch voll mit Blei und Schwefelsäure.

Wenn man sagt, in einem Raumbereich befinde sich Vakuum, so meint man, dass sich dort zwar keine Materie befindet, aber dafür etwas anderes: der Träger der elektromagnetischen Welle.

Solange keine Welle durch das Vakuum läuft, befindet es sich in seinem „Grundzustand“.

Die elektromagnetischen Wellen, die wir erzeugt haben, waren kurze Pulse, ähnlich wie wir mit dem Lautsprecher zuerst nur einzelne Stöße durch die Luft geschickt hatten. Um eine dauernde Welle zu erzeugen, müssen wir den elektrischen Strom in unserer Sendeantenne in schneller Folge ein- und ausschalten. Und wenn man eine elektromagnetische Sinuswelle haben will, muss man durch den Draht einen sinusförmigen Wechselstrom schicken. Damit die Antenne eine Welle abstrahlt, muss die Frequenz allerdings sehr hoch sein. Die 50 Hz des gewöhnlichen Wechselstroms sind zu wenig.

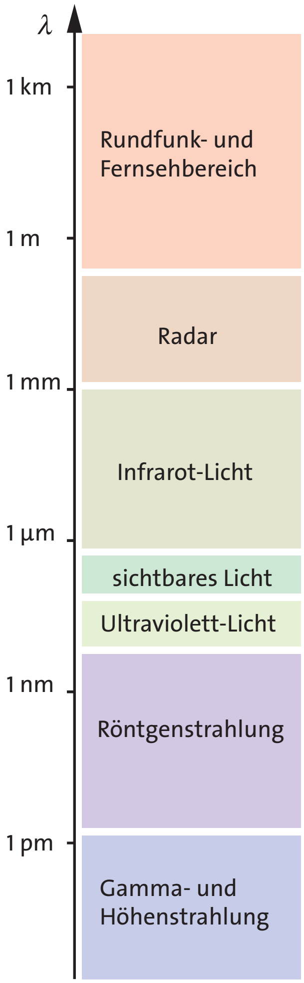


Abb. 28.21 Elektromagnetische Wellen haben je nach Wellenlänge verschiedene Anwendungen und verschiedene Namen.

Die Geschwindigkeit, mit der elektromagnetische Wellen laufen, kennst du schon: im Vakuum 300 000 km/s.

Elektromagnetische Wellen begegnen einem auf Schritt und Tritt, und zwar Wellen der verschiedensten Wellenlängen. Zum einen gibt es natürliche Quellen von elektromagnetischen Wellen der unterschiedlichsten Wellenlängen. Zum anderen werden aber auch Wellen vieler verschiedener Wellenlängen technisch genutzt.

Der Wellenlängenbereich der Wellen, die man erzeugt oder beobachtet, geht von Millionstel Nanometern bis zu Kilometern, siehe Abb. 28.21. Obwohl all diese Wellen derselben Natur sind, obwohl sie sich nur in der Wellenlänge unterscheiden, sind die Erzeugungsmethoden sehr verschieden. Außerdem passieren ganz verschiedene Dinge, wenn Wellen aus den verschiedenen Wellenlängenbereichen auf Materie treffen. Und daher kommt es, dass man sie zu ganz verschiedenen Zwecken verwenden kann. Und darum haben auch die Wellen je nach Wellenlängenbereich unterschiedliche Namen bekommen:

Gammastrahlen, Röntgenstrahlen, Ultraviolettstrahlen (oder ultraviolettes Licht), („sichtbares“) Licht, Infrarotstrahlen (oder Infrarotlicht, oder Wärmestrahlen), Mikrowellen, Radiowellen.

Die wichtigsten Anwendungen kann man in zwei Kategorien einteilen: Die elektromagnetischen Wellen dienen erstens als Datenträger und zweitens als Energieträger.

Elektromagnetische Wellen als Datenträger

Mit dem Licht kommen Informationen über unsere Umgebung, kurz Daten, in unsere Augen, aber auch in den Fotoapparat oder in die Fernsehkamera. Radiowellen und die etwas kürzeren Fernsehwellen bringen Daten von der Sendeantenne zur Empfangsantenne von Radio- bzw. Fernsehapparat.

Noch kürzere Wellen werden zu Datenübertragungen zu und von Satelliten verwendet. Sie werden mit Parabolantennen ausgesendet und empfangen. Auch die Übertragung von Rundfunk- und Fernsehprogrammen zwischen zwei Fernmeldetürmen geschieht mit elektromagnetischen Wellen aus diesem Wellenlängenbereich. Und auch das Radar arbeitet mit Wellen dieser Wellenlängen.

Die Erforschung des Weltalls geschieht fast ausschließlich mithilfe elektromagnetischer Wellen. Aus dem Weltall kommen Wellen der verschiedensten Wellenlängen zur Erde, von den Gammastrahlen bis zum Radiowellenbereich. Jede Strahlung bringt uns andere interessante Daten über ferne Planeten, Sterne, Galaxien, Quasare und andere merkwürdige Himmelskörper.

Aber auch zur Erforschung der Welt des Kleinen werden elektromagnetische Wellen benutzt. Besonders wichtig sind hier die Röntgenstrahlen. Der größte Teil der Kenntnisse, die man über den Aufbau fester Materie hat, wurde mit Röntgenstrahlen gewonnen.

Elektromagnetische Wellen als Energieträger

Alle elektromagnetischen Wellen tragen Energie. Und oft ist es der Energietransport, auf den es einem ankommt, den man wünscht. Aber manchmal ist es auch dieser Energietransport, der einem schadet.

Den sicher wichtigsten Energietransport mit elektromagnetischen Wellen stellt das Sonnenlicht dar. Es ist die Energiequelle der Lebewesen auf der Erde.

Ein anderer wichtiger Energietransport ist der durch die Infrarotstrahlung: Ein heißer Ofen gibt seine Energie (und seine Entropie) mit solcher Strahlung ab. Und die Erde gibt mit Infrarotlicht ebenso viel Energie an den Weltraum ab, wie sie mit dem sichtbaren Licht von der Sonne bekommt.

Im Mikrowellenherd wird Energie in die zu kochende oder aufzutauende Speise mit Wellen der Wellenlänge 12 cm transportiert. Der Energietransport mit sehr kurzwelliger Strahlung ist meist unerwünscht: Röntgenstrahlen und γ-Strahlen sind deshalb gefährlich, weil sie Moleküle in Lebewesen zerstören können.

Aufgaben

1. Warum stört ein Gewitter den Fernsehempfang?
2. Nenne verschiedene Quellen elektromagnetischer Wellen.

28.9 Stehende Wellen – Interferenz

Wir wollen untersuchen, was passiert, wenn zwei Wellen aufeinander treffen. Gibt es einen Zusammenstoß?

1. Zwei einzelne Wellen

Man sieht es am deutlichsten bei Seilwellen. Wir schicken von den beiden Enden eines langen Seils, das auf dem Boden liegt, gleichzeitig je eine Welle los, Abb. 28.22. Die Wellen laufen aufeinander zu, und vom Treffpunkt aus läuft dann nach beiden Richtungen wieder eine Welle weg. Was ist passiert? Sind die beiden Wellen voneinander abgeprallt? Sind sie aneinander reflektiert worden?

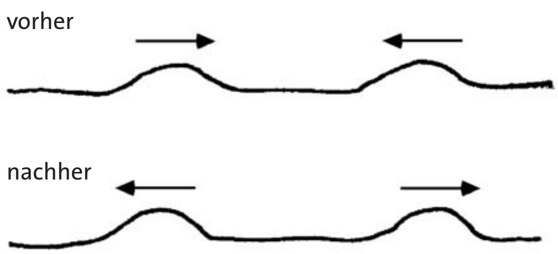


Abb. 28.22 Sind die beiden Wellen voneinander abgeprallt?

Wir ändern den Versuch etwas ab. Wir schicken vom einen Seilende eine Auslenkung (quer zum Seil) nach der einen Seite los und vom anderen Ende eine nach der anderen Seite, Abb. 28.23. Die Wellen, die nach dem Zusammentreffen an den Enden ankommen, sind die, die vom entgegengesetzten Ende losgeschickt worden sind. Die Wellen sind also nicht aneinander reflektiert worden, sie sind durcheinander hindurchgelaufen. Die eine Welle wurde durch die andere gar nicht gestört.

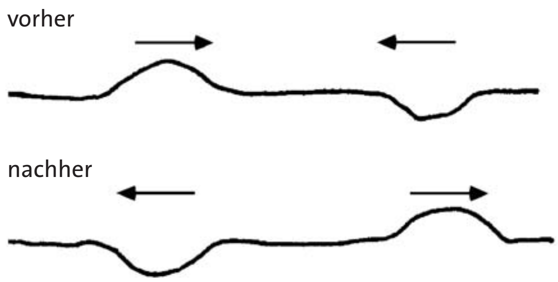


Abb. 28.23 Die Wellen laufen durcheinander hindurch.

28 WELLEN

Jede der beiden Wellen läuft über das ganze Seil, so als wäre die andere nicht da.

Was man bei unseren Experimenten nicht sehen konnte, weil es zu schnell ging:

In dem Augenblick, in welchem sich die Wellen in der Mitte treffen, addieren sich die Auslenkungen. Für die Wellen von Abb. 28.22 bedeutet das, dass sich einen Augenblick lang in der Mitte des Seils eine einzige Welle der doppelten Auslenkung befindet, Abb. 28.24.

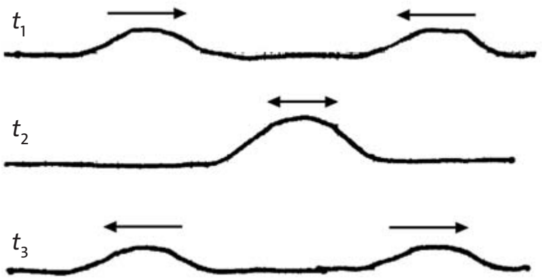


Abb. 28.24 Zum Zeitpunkt t_2 befindet sich in der Mitte ein Wellenberg der doppelten Auslenkung.

Und bei den Wellen von Abb. 28.23 ist das Seil einen Augenblick lang ganz gerade: Die Auslenkungen addieren sich zu Null, Abb. 28.25.

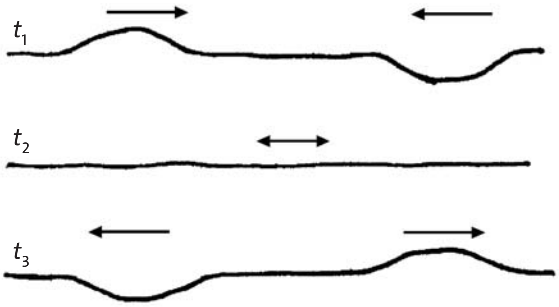


Abb. 28.25 Zum Zeitpunkt t_2 ist das Seil ganz gerade

Wir fassen zusammen:

> Wellen laufen ungestört durcheinander hindurch.

Wie viele andere Regeln, so gilt auch diese Regel nicht immer. Sie gilt nicht mehr, wenn die Auslenkungen der Wellen zu groß sind. Ein Beispiel: Zwei sehr große Wellen im Meer, zwei Wellen, die kurz vor dem Überbrechen sind und aufeinander zu laufen, gehen nicht mehr ungestört durcheinander hindurch. Die meisten Wellen, mit denen wir es zu tun haben, auch Schall und elektromagnetische Wellen, sind aber so schwach, dass die Behauptung sehr gut erfüllt ist.

2. Zwei periodische Wellen

Wieder benutzen wir das Seil. Wir legen es ausgestreckt auf den Boden und beginnen, an jedem der beiden Enden Sinuswellen loszuschicken, Abb. 28.26. Die Wellenzüge laufen aufeinander zu, bis sie sich begegnen, und laufen dann weiter durcheinander hindurch.

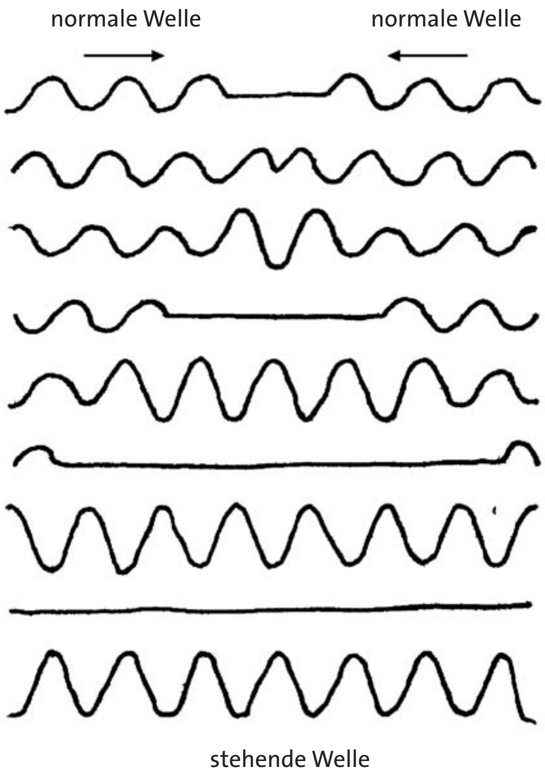


Abb. 28.26 Zwei Sinuswellen laufen aufeinander zu und durcheinander hindurch. Der Vorgang ist zu 9 aufeinander folgenden Zeitpunkten dargestellt.

Was man dabei sieht, ist merkwürdig. Es ist gar keine Bewegung mehr in die eine oder andere Richtung des Seils festzustellen. Abb. 28.27 zeigt einen Ausschnitt des Seils, in dem beide Wellen laufen, zu fünf verschiedenen Zeitpunkten. Das Seil ist sinusförmig. Aber die Höhe der Berge und Täler ändert sich. Die Stellen, an denen das Seil weder nach der einen noch nach der anderen Sei-

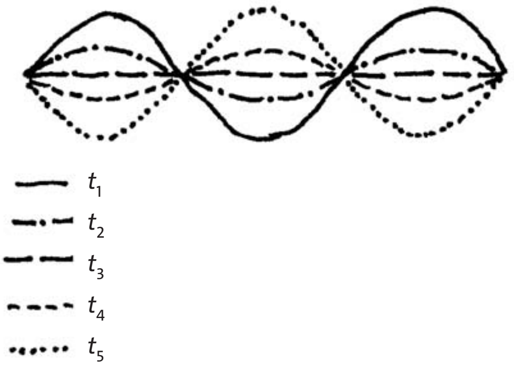


Abb. 28.27 Die verschiedenen Strichelungen entsprechen den Formen der stehenden Welle zu fünf verschiedenen Zeitpunkten.

te ausgelenkt ist, bleiben aber fest, sie wandern nicht in die eine oder andere Seilrichtung, wie es bei einer normalen Welle der Fall wäre.

Man nennt ein solches Gebilde eine stehende Welle. Die Stellen der stärksten Bewegung sind die Schwingungsbäuche, die Stellen des Seils, die sich nicht bewegen, die Schwingungsknoten.

Wie die Schwingungsbäuche und -knoten zustande kommen, zeigt Abb. 28.28. Die stehende Welle ist ja die Überlagerung von zwei gegeneinander laufenden gewöhnlichen Wellen. Man erhält die Auslenkung der stehenden Welle durch Addition der Auslenkungen der beiden Teilwellen.

Abb. 28.28 zeigt für drei verschiedene Zeitpunkte jeweils oben die beiden Teilwellen und darunter die durch Addition entstehende tatsächliche Welle. Man sieht: In den Schwingungsbäuchen ist die Amplitude der stehenden Welle doppelt so groß wie die einer einzelnen Teilwelle: Hier kommen ja immer zwei Auslenkungen derselben Richtung zusammen. An den Stellen der Schwingungsknoten sind die Auslenkungen der Teilwellen immer entgegengesetzt. Die Summe ist also immer Null.

Man sieht auch, dass der Abstand zwischen zwei benachbarten Schwingungsknoten gerade eine halbe Wellenlänge ist.

Damit die stehende Welle entsteht, müssen die Amplituden der beiden gegeneinander laufenden Wellen gleich groß sein. Verstärkung und Abschwächung stellt sich aber auch dann ein, wenn die Wellen nicht dieselbe Amplitude haben.

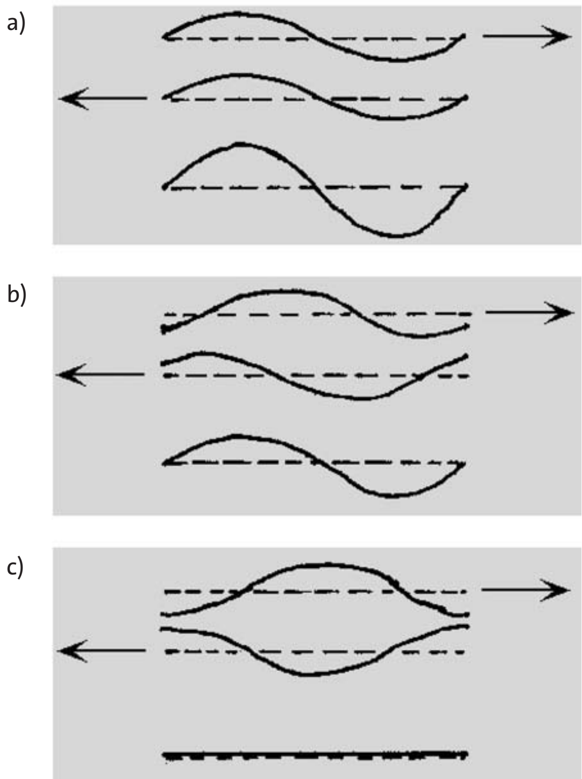


Abb. 28.28 Die stehende Welle entsteht durch Addition der Auslenkungen von zwei gegeneinander laufenden Wellen. Die Teilbilder a), b) und c) zeigen die Addition für drei aufeinander folgende Zeitpunkte.

Den Vorgang, bei dem die Überlagerung von zwei Wellen an manchen Stellen zu einer Verstärkung führt und an anderen zu einer Abschwächung oder Auslöschung, nennt man Interferenz. Man sagt auch, die beiden Wellen interferieren.

> Wenn zwei Sinuswellen gleicher Amplitude und Wellenlänge gegeneinander laufen, entsteht eine stehende Welle.
>
> Der Abstand zwischen zwei benachbarten Knoten ist eine halbe Wellenlänge.
>
> Den Vorgang der gegenseitigen Verstärkung und Abschwächung von Wellen nennt man Interferenz.

3. Reflexion von Wellen

Eine bequeme Methode zum Erzeugen stehender Wellen: Man lässt eine Sinuswelle reflektieren. Die reflektierte Welle überlagert sich mit der einlaufenden, und es entsteht eine stehende Welle, Abb. 28.29. Die Methode geht zum Beispiel mit Seilwellen. Ende A des Seils wird irgendwo befestigt. Ende B wird sinusförmig hin- und herbewegt. Von B läuft eine Sinuswelle los, die Welle wird bei A reflektiert. Das Ergebnis ist eine stehende Welle. Deutlich ausgebildet ist die stehende Welle aber nur in der Nähe von Ende B, denn nur dort haben die beiden Teilwellen die gleiche Amplitude. Bei A ist die in Richtung B laufende Welle viel stärker als die von B kommende, denn von jeder Welle geht auf dem Weg etwas verloren.

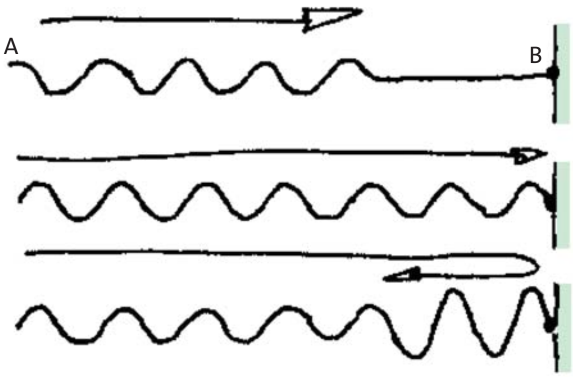


Abb. 28.29 Die einlaufende Welle interferiert mit der reflektierten Welle.

Unsere Methode der Erzeugung stehender Wellen funktioniert auch sehr gut mit Schallwellen, Abb. 28.30. Der Lautsprecher schickt eine Sinuswelle gegen die Wand. Die Welle wird an der Wand reflektiert. Reflektierte und einfallende Welle interferieren, es entsteht eine stehende Schallwelle.

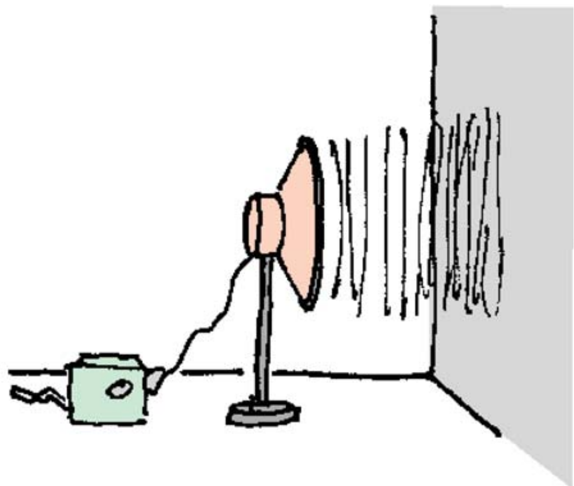


Abb. 28.30 Erzeugung stehender Schallwellen durch Reflexion an einer Wand

Wir bewegen ein Mikrophon, an das ein Oszilloskop angeschlossen ist, zwischen Lautsprecher und Wand hin und her. Am Oszilloskop sieht man deutlich die Stellen der Verstärkung und die Stellen der Abschwächung. Während die Seilwelle ein eindimensionales Gebilde ist, ist die Schallwelle dreidimensional. Sie läuft in eine bestimmte Richtung und ist in den beiden dazu senkrechten Richtungen ausgedehnt. Die Knoten sind hier keine Punkte, wie beim Seil, sondern ganze Flächen.

Man könnte auf die Idee kommen, auf dieselbe Art stehende Wellen mit Licht zu erzeugen: Man müsste einfach einfarbiges Licht (d. h. eine sinusförmige Lichtwelle) auf einen Spiegel schicken. Tatsächlich entstehen vor dem Spiegel Knoten und Bäuche. Weil die Wellenlänge des Lichts aber sehr klein ist, liegen die Knoten so dicht beieinander, dass es recht schwer ist, sie nachzuweisen. Wir werden später einen Trick kennen lernen, der es uns ermöglicht, die Abstände zwischen den Knoten zu vergrößern.

4. Eingesperrte Wellen

Wir befestigen wieder Ende A unseres Seils, halten aber diesmal Ende B in der Luft, und ziehen das Seil straff. Es berührt während des ganzen Experiments nicht den Boden. Dadurch ist die Reibung geringer als in den vorhergehenden Experimenten, und die Wellen im Seil werden viel weniger abgeschwächt. Wenn wir jetzt eine Sinuswelle erzeugen, wird diese nicht nur bei B reflektiert: Sie läuft zurück und wird bei A ein zweites Mal reflektiert. Wenn nun die Wellenberge bei A im richtigen Moment eintreffen, so ergibt sich Verstärkung: Die von B zurückgeworfene Welle interferiert so mit der bei A neu erzeugten, dass Verstärkung auftritt. Die Bewegung des Seils „schaukelt sich auf“ zu einer stehenden Welle, die bei A und bei B je einen Knoten hat. Damit eine solche stehende Welle entsteht, muss auf die Seillänge l gerade ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge passen, Abb. 28.31. Es muss gelten:

$$l = n\,\lambda/2 \qquad n = 1, 2, 3\,...$$

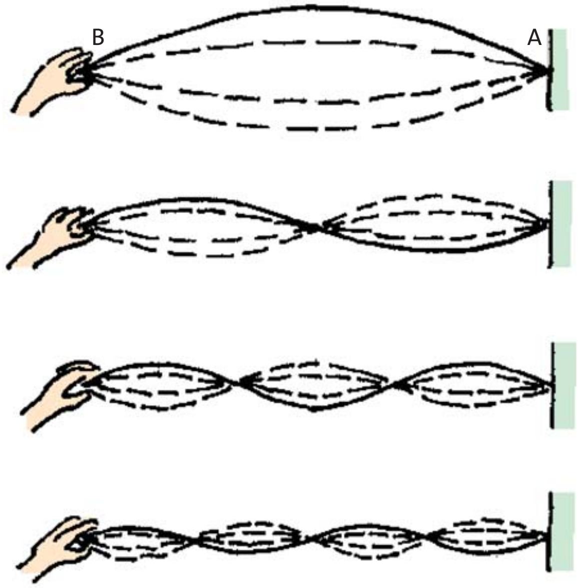


Abb. 28.31 Eigenschwingungen eines Seils: Auf die Seillänge passt ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge.

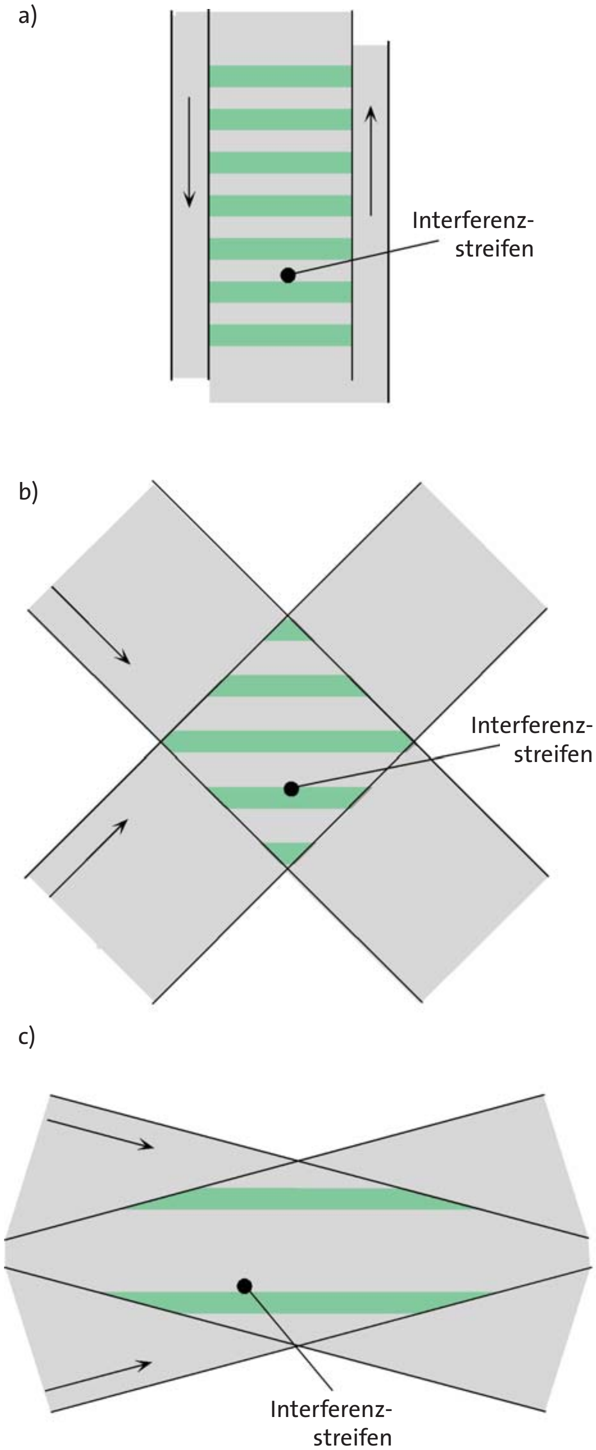


Abb. 28.32 (a) Die Wellen laufen gegeneinander, die Interferenzstreifen liegen sehr dicht. (b) Die Wellen laufen nicht mehr gegeneinander, die Interferenzstreifen liegen weniger dicht. (c) Die Wellen laufen fast in dieselbe Richtung. Die Interferenzstreifen haben einen großen Abstand voneinander.

Da zu jeder Wellenlänge eine ganz bestimmte Frequenz gehört, muss man das Seilende mit einer ganz bestimmten Frequenz bewegen, um eine der möglichen stehenden Wellen zu erhalten. Man nennt diese Bewegungen Eigenschwingungen des Seils. Bewegt man das Seilende mit einer nicht passenden Frequenz, so entsteht eine unübersichtliche, nicht periodische Bewegung des Seils.

Wenn die Seillänge gleich $\lambda/2$ ist, d. h. für $n = 1$, liegt die „Grundschwingung" vor. Wenn zwei halbe Wellenlängen auf das Seil passen, hat man die „erste Oberschwingung", bei drei halben Wellenlängen die „zweite Oberschwingung" usw.

Genau diese Eigenschwingungen sind es, die die Saiten eines Saiteninstruments ausführen, d. h. eines Klaviers, einer Geige, eines Cellos, einer Gitarre. Bei Gitarre und Streichinstrumenten hat die spielende Person die Möglichkeit, entweder die Grundschwingung oder eine Oberschwingung stärker anzuregen.

> Eigenschwingungen einer Saite: Auf die Saitenlänge passt gerade ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge.

5. Wellen, die in verschiedene Richtungen laufen

Jetzt der Trick, mit dem man die Interferenz von Licht zeigen kann. Wir erklären ihn an Hand einer zweidimensionalen Welle, einer Welle auf einer Wasseroberfläche zum Beispiel. Denn diese lässt sich leichter zeichnen, Abb. 28.32.

Abb. 28.32a zeigt zwei Wellen, die gegeneinander laufen. Im Bild kommt eine von oben, die andere von unten. Die Stellen der Auslöschung sind die waagrechten Linien.

Wir verdrehen nun die Richtungen der beiden Wellen, und zwar die eine nach rechts, die andere nach links, Abb. 28.32b. Die Stellen der Auslöschung sind nach wie vor waagrechte Linien. Allerdings hat ihr Abstand etwas zugenommen.

Wir verdrehen die Wellen weiter, Abb. 28.32c. Die Stellen der Auslöschung wandern noch weiter auseinander.

Wenn die Wellen schließlich in einem sehr spitzen Winkel aufeinander zu laufen, haben die Linien, auf denen Auslöschung stattfindet, einen sehr großen Abstand.

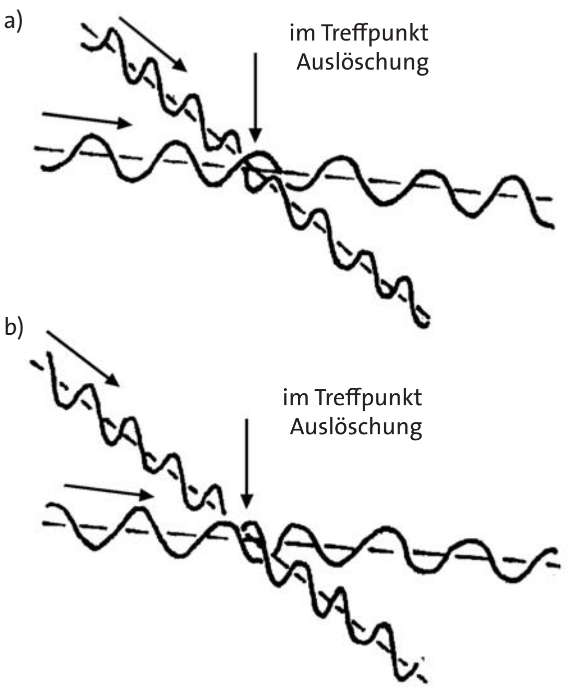


Abb. 28.33 Zwei „Momentaufnahmen" von zwei interferierenden Wellen. Die Auslöschung findet zu beiden Zeitpunkten an denselben Stellen statt.

In Abb. 28.33a ist diese Situation noch einmal dargestellt. Hier sind die beiden einlaufenden Wellen (für einen bestimmten Zeitpunkt) perspektivisch im Querschnitt gezeichnet. Abb. 28.33b zeigt dieselben Wellen einen Augenblick später: Beide Wellen sind um eine halbe Wellenlänge vorgerückt. Am Treffpunkt findet aber nach wie vor Auslöschung statt.

Wir kehren zurück zum Licht. Wenn man zwei Lichtstrahlen in sehr spitzem Winkel durcheinander hindurchlaufen lässt, so ergibt sich Auslöschung in Ebenen, die parallel zur Winkelhalbierenden zwischen den Strahlen liegen. Die Ebenen sind umso weiter voneinander entfernt, je spitzer der Winkel zwischen den Lichtstrahlen ist. Man kann den Abstand der Auslöschungsstellen so groß machen, dass sie sich bequem beobachten lassen.

Abb. 28.34 zeigt ein Experiment. Die beiden gegeneinander geneigten Lichtstrahlen erzeugt man so: Ein Lichtstrahl fällt unter sehr spitzem Winkel auf einen Spiegel, der aus zwei Teilen besteht. Die beiden Spiegelhälften sind um einen sehr kleinen Winkel gegeneinander verdreht. Der Strahl trifft den Spiegel so, dass die eine Hälfte des Strahls auf die eine Spiegelhälfte fällt und die andere Strahlhälfte auf die andere Spiegelhälfte. Die Richtungen der reflektierten Teilstrahlen bilden nun einen spitzen Winkel. Die Teilstrahlen durchdringen sich und interferieren.

Da der Winkel zwischen den beiden Teilstrahlen sehr klein ist, haben die Auslöschungsebenen einen großen Abstand. Man stellt in das Interferenzgebiet einen weißen Schirm (in Abb. 28.34 nicht eingezeichnet). Auf dem Schirm sieht man deutlich ein „Interferenzmuster": helle und dunkle Streifen.

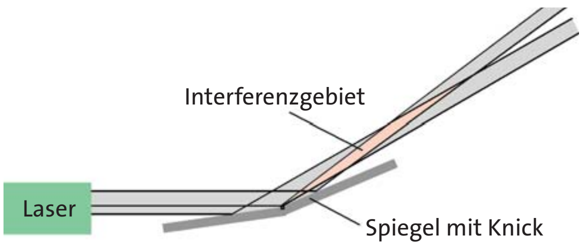


Abb. 28.34 Experiment zur Interferenz von Licht

Dieses Experiment wurde zum ersten Mal zu Anfang des 19. Jahrhunderts gemacht. Es wurde als eindeutiger Beweis dafür betrachtet, dass Licht eine Welle ist.

> Licht zeigt Interferenz.

Aufgaben

1. Ist Wind eine Welle? Können zwei „Winde“ ungestört durcheinander hindurchlaufen?
2. Was passiert, wenn zwei Wellen gleicher Wellenlänge, aber verschiedener Amplitude aus entgegengesetzter Richtung kommend durcheinander hindurchlaufen?
3. Ein 1 m langes elastisches Seil ist an einem Ende fest angebunden. Durch ständiges Auf- und Abbewegen des freien Endes kann man eine Welle erzeugen, die mit der Geschwindigkeit 6 m/s durch das Seil läuft und an den Enden reflektiert wird. Welche Wellenlänge darf die erzeugte Welle maximal haben, damit im Seil eine stehende Welle entsteht? Mit welcher Frequenz muss das freie Ende auf- und abbewegt werden, damit in dem Seil eine stehende Welle mit zwei Knoten entsteht (zusätzlich zu den Knoten an den Seilenden)? Skizziere, wie sich das Seil in diesem Fall bewegt.
4. Was passiert, wenn sich zwei Wellen überlagern, die gleiche Amplitude und gleiche Wellenlänge haben, und die in dieselbe Richtung laufen?

29 PHOTONEN

29.1 Chemische Reaktionen mit Licht

Es gibt chemische Reaktionen, an denen Licht als einer der Reaktionspartner beteiligt ist. Solche Reaktionen nennt man photochemische Reaktionen (vom griechischen Wort phos für Licht).

Du weißt, dass man Reaktionen durch Reaktionsgleichungen beschreibt. So lässt sich die Reaktion eines Stoffes A mit einem Stoff B zu einem Stoff C schreiben als

$$A + B \rightarrow C.$$

Ein konkretes Beispiel ist die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, also

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O.$$

Bei der Reaktion verschwinden die Stoffe Wasserstoff und Sauerstoff, und es entsteht der Stoff Wasser. Es gibt nun auch Reaktionen, bei denen neben anderen Stoffen Licht entsteht oder verschwindet. Dazu einige Beispiele.

Leuchtstäbe

Im Autozubehörhandel sind so genannte Leuchtstäbe erhältlich. Ein Leuchtstab besteht aus einem durchsichtigen Kunststoffrohr, in dem sich zwei Flüssigkeiten A und B befinden, die zunächst voneinander getrennt sind. Wenn man das Kunststoffrohr etwas verbiegt, zerbricht die Trennwand zwischen den beiden Flüssigkeiten. Sie durchmischen sich und beginnen, miteinander zu reagieren. Bei der Reaktion entsteht neben einer Flüssigkeit C auch Licht.

Ein Leuchtstab ist also eine Lichtquelle, die ohne Batterie und Steckdose funktioniert und bei nächtlichen Pannen oder Unfällen als Signallampe eingesetzt werden kann. Auch manche Angler verwenden Leuchtstäbe, die an den Schwimmern befestigt werden, um beim Angeln im Dunkeln den Ort der Schwimmer ausmachen zu können.

In Reaktionsgleichungen verwendet man als Symbol für das Licht den griechischen Buchstaben γ. Die Gleichung für die Reaktion in einem Leuchtstab lautet deshalb

$$A + B \rightarrow C + \gamma\,.$$

Die Reaktionsgleichung kann auch komplizierter sein, weil nicht nur zwei, sondern mehr Stoffe entstehen, oder weil die Reaktion in mehreren Schritten abläuft, also Zwischenprodukte entstehen. Worauf es uns hier ankommt, ist nur die Tatsache, dass sich das Licht wie ein gewöhnlicher Stoff verhält.

Die Stoffe A und B im Leuchtstab wählt man so, dass sie nicht sofort vollständig miteinander reagieren, sondern nach und nach. Es kann mehrere Stunden dauern, bis A und B vollständig verschwunden sind und die Reaktion endet. Licht entsteht natürlich nur, solange die Reaktion noch läuft.

Ozon in der Erdatmosphäre

Das Ozon (O_3), das die Erdatmosphäre enthält, absorbiert das von der Sonne kommende ultraiolette Licht der Wellenlängen von 200 — 320 nm. Eine Folge davon ist, dass fast kein UV-Licht dieser Wellenlängen auf die Erdoberfläche gelangt. Das ist wichtig, weil dieses Licht die Zellen von Lebewesen zerstören kann. Es ist die Hauptursache von Sonnenbrand und Hautkrebs.

> Das Ozon in der Atmosphäre sorgt dafür, dass von der Sonne kommendes UV-Licht der Wellenlängen 200 — 320 nm nicht auf die Erdoberfläche gelangt.

Seine Entstehung verdankt das Ozon einer Reaktion von O_2 mit anderem Licht: UV-Licht der Wellenlängen 150 — 200 nm.

$$2\,O_2 + \gamma_{150-200} \rightarrow O + O_3. \qquad (29.1)$$

Das Ozon kann nun durch Reaktion mit dem ebenfalls entstehenden atomaren Sauerstoff wieder verschwinden:

$$O_3 + O \rightarrow 2\,O_2. \qquad (29.2)$$

Die Gleichungen (29.1) und (29.2) sagen uns, dass der Ozongehalt der Atmosphäre das Resultat eines Fließgleichgewichts ist. Nach Gleichung (29.1) wird Ozon mit konstanter Umsatzrate produziert. Die Umsatzrate der Rückreaktion (29.2) hängt davon ab, wie viel O_3 und wie viel O schon vorhanden ist. Sie stellt sich so ein, dass die Produktion von Ozon nach Gleichung (29.1) gerade gleich der Zerstörung von Ozon nach Gleichung (29.2) ist.

Das Ozonloch der Atmosphäre entsteht dadurch, dass Reaktion (29.2) durch einen Katalysator beschleunigt wird. Beim Hinzugeben eines Katalysators wird Reaktion (29.2) zunächst schneller laufen, es wird mehr Ozon vernichtet als erzeugt, das Fließgleichgewicht wird gestört. Dadurch nimmt der Ozongehalt der Atmosphäre ab. Diese Abnahme hat zur Folge, dass Reaktion (29.2) wieder langsamer wird, und zwar so lange, bis die Zerstörungsrate wieder gleich der Erzeugungsrate ist. Das Fließgleichgewicht hat sich wieder eingestellt. Der Ozongehalt ist aber jetzt geringer als im ursprünglichen Zustand.

Ein Katalysator, der Reaktion (29.2) beschleunigen kann und damit eine Verringerung des Ozongehalts der Atmosphäre verursacht, ist Chlor. Das Chlor gelangt überwiegend als Bestandteil der Fluorchlorkohlenwasserstoffe, kurz FCKW genannt, in die Atmosphäre. Dort zerfallen diese Stoffe, und es entsteht Chlor.

FCKW werden als Kühlmittel in Kühlschränken und Tiefkühltruhen, als Treibmittel in Sprühdosen und zum Aufschäumen von Kunststoffen als Isolationsmaterial benutzt.

In den letzten Jahrzehnten hat die Produktion von FCKW stark zugenommen, und daher sind diese Stoffe auch in immer größeren Mengen in die Atmosphäre gelangt. Die damit verbundene Verringerung des Ozongehalts der Atmosphäre führt dazu, dass mehr UV-Licht auf die Erdoberfläche gelangt — mit den genannten Folgen für die Lebewesen.

Photosynthese

Die Photosynthese in Pflanzen ist eine photochemische Reaktion, die von großer Bedeutung für alles Leben auf der Erde ist. Bei dieser Reaktion bilden die Pflanzen Glucose (Traubenzucker, $C_6H_{12}O_6$) und Sauerstoff (O_2) aus Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasser (H_2O) und Licht. Glucose verwenden die Pflanzen als Baustoffe für ihre Zellen und als Energiespeicher.

Die Photosynthese ist eine komplizierte Reaktion mit vielen Zwischenschritten. Wenn man die Zwischenschritte übergeht, also nur die Ausgangs- und Endstoffe betrachtet, lautet die Reaktionsgleichung

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + 48\,\gamma \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2.$$

Diejenigen Teile der Pflanzen, in denen diese Reaktion stattfindet, sind grün. Der Grund dafür ist, dass die Photosynthese mit grünem Licht fast nicht abläuft, wohl aber mit den restlichen Anteilen des Sonnenlichts. Diese restlichen Anteile verschwinden also, während das grüne Licht übrig bleibt.

Fotografische Filme

Ein fotografischer Film enthält Silberbromid, AgBr. Bei der Belichtung eines Films in einem Fotoapparat reagiert das auf den Film treffende Licht mit dem Silberbromid zu Silber und Brom:

$$AgBr + \gamma \rightarrow Ag + Br.$$

An allen Stellen eines Films, auf die bei einer Aufnahme Licht auftrifft, befindet sich also nach der Belichtung Silber. Bei der Entwicklung des Films reagiert das Silberbromid an den Stellen, an denen sich Silber befindet, mit den Entwicklerstoffen. Bei dieser Reaktion entsteht weiteres Silber, das sich mit dem bereits vorhandenen Silber zu kleinen Silberklümpchen verbindet. Anhäufungen solcher Silberklümpchen schlucken auftreffendes Licht, der Film wird dort schwarz. Wo kein Licht auftrifft, entsteht kein Silber, bei der Entwicklung also auch keine Silberklümpchen. Der Film bleibt dort durchsichtig.

Leuchtziffern und -zeiger

Die Ziffern und Zeiger mancher Uhren leuchten bei Nacht. Der Leuchtstoff A, der sich auf den Ziffern und Zeigern befindet, reagiert zu einem Stoff B und zu Licht

$$A \rightarrow B + \gamma. \tag{29.3}$$

Die Reaktion kommt zum Stillstand, sobald A vollständig zu B und γ reagiert hat. Falls A nicht nachgeliefert wird, müsste das Leuchten nach einiger Zeit aufhören. Tatsächlich wird das Leuchten der Ziffern und Zeiger im Laufe einer Nacht schwächer. Am nächsten Abend ist es aber wieder kräftiger. A muss also tagsüber nachgeliefert werden. Das ist auch leicht möglich. Die Reaktion ist nämlich umkehrbar:

$$B + \gamma \rightarrow A. \tag{29.4}$$

Wann läuft aber Reaktion (29.3) und wann Reaktion (29.4) ab? Ist wenig Licht vorhanden, also im Dunkeln, so zerfällt A nach Gleichung (29.3). Ist dagegen viel Licht vorhanden, so wird nach Gleichung (29.4) A neu gebildet.

An den diskutierten Beispielen kannst du sehen:

> Bei photochemischen Reaktionen verhält sich Licht wie ein Stoff.

29.2 Photonen

Jeder Stoff besteht aus kleinsten Portionen, den Atomen bzw. Molekülen. Wenn sich Licht wie ein gewöhnlicher Stoff verhält, ist zu erwarten, dass es auch kleinste Lichtportionen, eine Art „Lichtatome“ gibt. Im Folgenden wirst du ein Experiment kennen lernen, das diese Vermutung bestätigt.

Die „Atome“ des Lichts sind mit bloßen Augen genauso wenig zu erkennen wie die Atome anderer Stoffe. Was wir brauchen, ist ein sehr empfindliches Lichtmessgerät, einen so genannten Photomultiplier. Wenn man den Sensor des Photomultipliers ins Licht hält, reagiert er mit dem auftreffenden Licht, das Licht wird absorbiert. Auf einem Anzeigegerät kann man ablesen, wie groß die pro Zeit vom Photomultiplier absorbierte Lichtmenge ist.

Wir wollen das Licht einer gewöhnlichen Glühlampe untersuchen. Wenn man dieses Licht direkt auf den Photomultiplier fallen ließe, würde dieser allerdings sofort zerstört. Es wäre ähnlich, als versuchte man, einen Elefanten mit einer Briefwaage zu wiegen. Wir müssen das Licht der Glühlampe, bevor es auf den Photomultiplier trifft, abschwächen: mit einem Graufilter, das nur sehr wenig Licht hindurchlässt.

Die Glühlampe wird an ein regelbares Netzgerät angeschlossen. Wir vergrößern nun langsam die Stärke des elektrischen Stroms durch die Glühbirne, sodass sie schwach zu leuchten beginnt. Sie sendet so viel Licht aus, dass wir es mit den Augen gerade noch wahrnehmen können. Obwohl sich der Photomultiplier hinter dem Graufilter befindet, „sieht“ er die schwach leuchtende Glühbirne durch das Filter hindurch: das Anzeigegerät des Photomultipliers schlägt aus.

Abb. 29.1 zeigt, welche Ausschläge das Anzeigegerät in einem Zeitraum von 5 ms (5 Tausendstel Sekunden) ausführt.

Das Überraschende ist, dass es nicht zeitlich konstant ausschlägt, sondern in unregelmäßig aufeinander folgenden Pulsen. In den Zwischenzeiten ist der Ausschlag Null. Der Photomultiplier „sieht“ also keine gleichmäßig leuchtende Lampe, sondern schwache Lichtblitze, die in unregelmä-

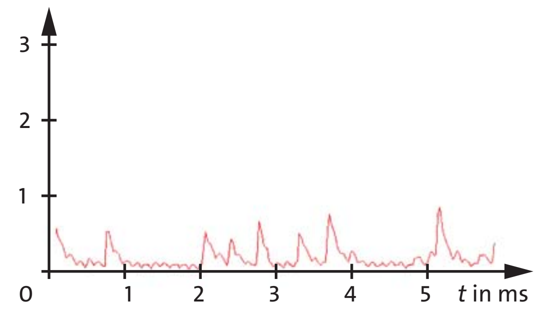


Abb. 29.1 Das Messgerät schlägt in unregelmäßig aufeinander folgenden Pulsen aus.

ßigen, aber sehr kurzen Abständen aufeinander folgen. Anders ausgedrückt: Die Reaktion des Lichts mit dem Sensor des Photomultipliers erfolgt nicht kontinuierlich, sondern portionsweise. Diese Lichtportionen nennt man Photonen.

Wenn die Stärke des elektrischen Stroms durch die Lampe erhöht wird, die Lampe also heller leuchtet, folgen die Ausschläge in kürzeren Abständen aufeinander, Abb. 29.2. Manchmal kommen zwei Photonen fast gleichzeitig, dann schlägt das Anzeigegerät stärker aus. Was sich mit der Helligkeit der Lampe ändert, ist also die Häufigkeit, mit der Lichtportionen am Photomultiplier ankommen.

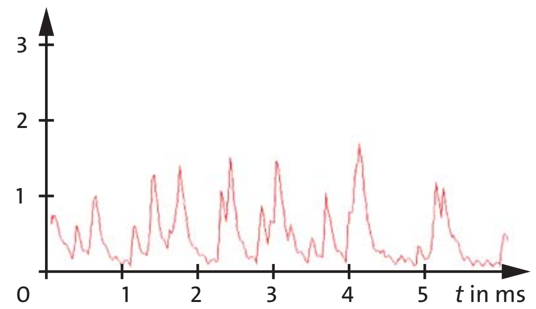


Abb. 29.2 Die Lampe leuchtet heller, das Messgerät schlägt häufiger aus.

Licht reagiert portionsweise mit anderen Stoffen. Die Lichtportionen nennt man Photonen.

Wir erhöhen die Helligkeit der Glühlampe weiter. Die Ausschläge des Anzeigegeräts rücken immer enger zusammen, bis sie schließlich ineinander fließen, Abb. 29.3.

Eine weitere Erhöhung der Helligkeit hat einen allgemeinen Anstieg des jetzt kontinuierlichen

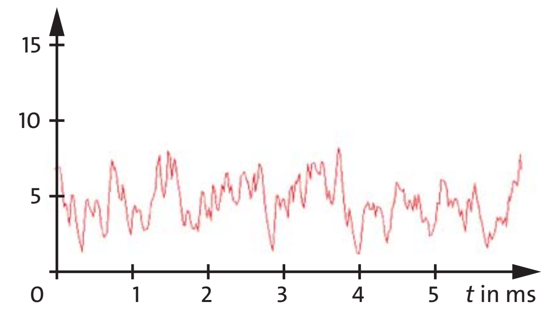


Abb. 29.3 Die Lampe leuchtet so hell, dass das Messgerät kontinuierlich ausschlägt.

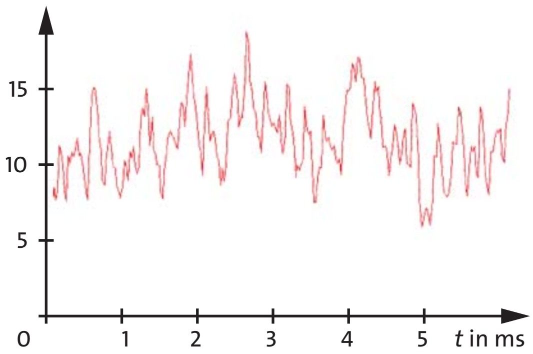


Abb. 29.4 Bei noch hellerer Lampe steigt der Ausschlag insgesamt an.

Ausschlags zur Folge, Abb. 29.4. Das Messgerät „sieht" keine einzelnen Lichtblitze mehr, sondern ein ständiges Leuchten.

Wenn wir statt der Glühlampe einen Laser als Lichtquelle benutzen, ist das Ergebnis dasselbe. Solange nur ein sehr schwacher Laserstrahl auf den Photomultiplier trifft, registriert das Anzeigegerät wieder nur unregelmäßig aufeinander folgende Pulse. Wenn der auftreffende Laserstrahl stärker wird, rücken die Pulse zusammen und fließen schließlich ineinander.

Photonen bewegen sich selbstverständlich mit Lichtgeschwindigkeit, in Luft und im leeren Raum also mit 300 000 km/s.

Die „Entdeckung" der Photonen (die auch Lichtquanten genannt werden) in den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts leitete große Umwälzungen in der Physik ein. Vielleicht ist dir der Begriff Quantenphysik schon einmal begegnet. Die Quantenphysik ist das Resultat dieser Umwälzungen und Grundlage eines großen Teils der modernen Physik.

29.3 Die Größe von Photonen

Photonen haben keine einheitliche Gestalt. Form und Größe hängen von der Lichtquelle ab, ändern sich aber auch noch auf dem Weg nach Verlassen der Lichtquelle. So sind die Photonen des Lasers aus der Schulsammlung etwa 10 cm lang und haben denselben Durchmesser wie der Laserstrahl selbst, d. h. etwa 5 mm. Sie ähneln in Form und Größe also einem Bleistift. Es gibt Laser, deren Photonen viel länger sind. Die Länge von Laserphotonen kann mehrere Kilometer betragen.

Die Photonen des Sonnenlichts sind viel kürzer. Ihre Länge hat ungefähr denselben Wert wie ihre Wellenlänge, also etwa 600 nm. Ihr Durchmesser beträgt etwa 0,06 mm (allerdings nur, wenn das Sonnenlicht nicht von Wolken oder Nebel gestreut wird — sonst ist er noch kleiner). Das ist ungefähr das 100fache der Länge. Die Photonen des Sonnenlichts ähneln also in der Form einem Pfannkuchen.

Dass die Photonen eines Lasers relativ groß sind, hat zur Folge, dass sie in einem normalen, nicht abgeschwächten Laserstrahl ineinander fließen, sie sind nicht voneinander getrennt. Aber auch aus diesem kontinuierlichen „Lichtbrei" kann man durch Absorption nie Bruchteile von Lichtportionen, sondern immer nur ganze Photonen herausholen.

Beim Sonnenlicht, genauso wie beim Licht einer gewöhnlichen Glühlampe, sind die Photonen so klein, dass sie nicht miteinander verschmelzen. Sie sind räumlich voneinander getrennt wie die Wassertropfen des Regens.

Obwohl Licht aus Photonen besteht, nehmen wir das Licht, das in unsere Augen trifft, als kontinuierlichen Lichtstrom wahr. Das liegt am zeitlichen Auflösungsvermögen unserer Netzhaut. Die Netzhaut ist zu träge, um die in sehr kurzen zeitlichen Abständen auftreffenden Photonen einzeln zu registrieren.

29.4 Energie und Impuls von Photonen

Da Licht Energie transportiert, transportiert auch jedes Photon Energie. Die transportierte Energiemenge ist aber nicht für alle Photonen gleich. Sie hängt auf sehr einfache Art mit der Frequenz des Lichts zusammen: $E_{\text{Photon}} \sim f$.

> Die Energie eines Photons ist proportional zur Frequenz des Lichts.

Der Proportionalitätsfaktor ist die Planck'sche Konstante h (nach Max Planck, dem Entdecker der Photonen). Sie hat den Wert

$$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s}. \tag{29.5}$$

Es ist also $E_{\text{Photon}} = h \cdot f$.

Mit dieser Gleichung kann man die Energie von Photonen berechnen, wenn man die Frequenz kennt.

Oft ist aber nicht die Frequenz, sondern die Wellenlänge des Lichts bekannt. Man kann dann zunächst die Frequenz aus der Wellenlänge berechnen. Wir erinnern uns an die Beziehung zwischen Wellenlänge λ, Frequenz f und Geschwindigkeit c:

$$c = \lambda \cdot f.$$

Daraus folgt:

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

Große Frequenz bedeutet kleine Wellenlänge und umgekehrt. Wir setzen den Ausdruck in Gleichung (29.5) ein und erhalten

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Also: Je größer die Wellenlänge des Lichts, desto geringer ist die Energie seiner Photonen.

Wir berechnen die Energie der Photonen von rotem Licht ($\lambda = 8 \cdot 10^{-7}$ m):

$$\begin{aligned} E_{\text{rot}} &= \frac{hc}{\lambda_{\text{rot}}} \\ &= \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\,\text{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{8 \cdot 10^{-7}\,\text{m}} \\ &\approx 2{,}5 \cdot 10^{-19}\,\text{J} \end{aligned}$$

und von blauem Licht ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ m):

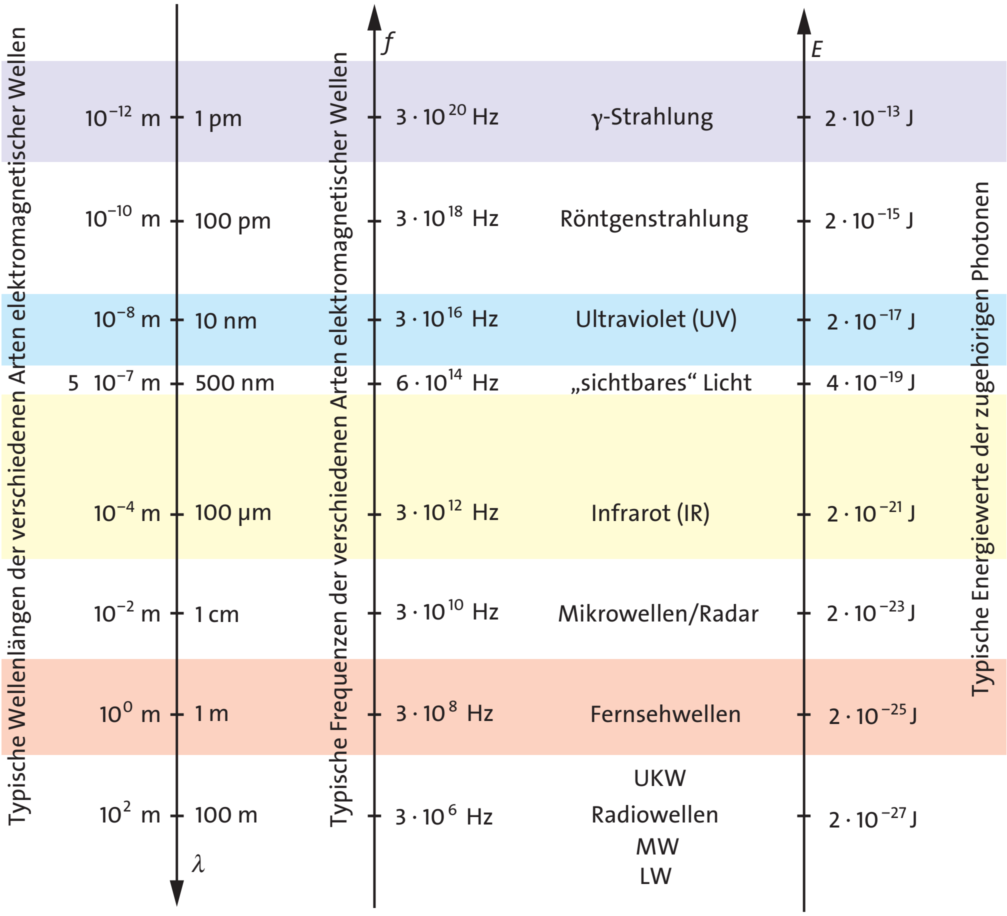


Abb. 29.5 Übersicht über die typischen Werte von Wellenlänge und Frequenz der verschiedenen Arten elektromagnetischer Wellen, sowie die Energie der zugehörigen Photonen

$$E_{\text{blau}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{blau}}} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\,\text{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{4 \cdot 10^{-7}\,\text{m}} \approx 5 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$$

Im Vergleich zu den Energiemengen, mit denen wir es im Alltag zu tun haben, sind diese Energien winzig. Bei gewöhnlichen Lichtverhältnissen sind deshalb immer sehr viele Photonen im Spiel. Eine Taschenlampe erzeugt etwa 10^{15} Photonen pro Sekunde. Das Sonnenlicht, das in einer Sekunde auf einen Quadratmeter der Erdoberfläche trifft, besteht aus etwa 10^{21} Photonen. Auch der Impuls, den ein Photon transportiert, ist proportional zur Frequenz der zugehörigen Lichtsorte. Es ist

$$p = \frac{h}{c} \cdot f\,.$$

Oder umgerechnet auf die Wellenlänge:

$$p = \frac{h}{\lambda}\,.$$

Der Impuls eines Photons von rotem Licht beträgt damit

$$p_{\text{rot}} = \frac{h}{\lambda_{\text{rot}}} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}}{8 \cdot 10^{-7}\,\text{m}} \approx 8{,}25 \cdot 10^{-28}\,\text{Hy}.$$

Der Impuls eines Photons des blauen Lichts ist doppelt so groß:

$$p_{\text{blau}} = 16{,}5 \cdot 10^{-28}\ \text{Hy}.$$

So fließt z. B. mit dem auf die Erde treffenden

Sonnenlicht ein Impulsstrom der Stärke $3 \cdot 10^8$ Huygens pro Sekunde (= 300 Millionen Newton) in die Erde. Das Sonnenlicht drückt also gegen die Erde, wie ein Wasserstrahl, der auf einen Ball trifft gegen den Ball.

Bisher haben wir nur über sichtbares Licht und UV-Licht gesprochen. Was für diese beiden Lichtsorten gilt, gilt aber genauso für alle anderen Arten, also für Radio- und Fernsehwellen, Mikrowellen, Infrarotlicht, Röntgen- und Gammastrahlung: Alle diese Strahlungen verhalten sich nicht nur wie Wellen, sondern auch wie Stoffe. Und auch die Beziehungen zwischen der Frequenz der Wellen und der Energie und dem Impuls der Photonen sind dieselben wie bei sichtbarem Licht. In Abb. 29.5 findest du eine Übersicht über die typischen Werte für die Frequenz und die Wellenlänge der verschiedenen Arten elektromagnetischer Wellen, sowie über die Energie der zugehörigen Photonen.

γ-Strahlung hat die kürzeste Wellenlänge und die höchste Frequenz. Folglich sind die Photonen der γ-Strahlung die energiereichsten. Radiowellen dagegen haben eine große Wellenlänge und eine niedrige Frequenz. Ein Radiophoton hat deshalb sehr wenig Energie. Beachte, dass sich die Energiewerte vom einen zum anderen Photonentyp in der Abbildung meist um den Faktor 100 unterscheiden.

Aufgaben

1. a) Berechne Energie und Impuls eines „SWR-3-Photons“ (Frequenz von SWR 3: 98,4 MHz).
b) Berechne Energie und Impuls der Photonen von Röntgenstrahlung mit einer Wellenlänge von 150 pm.
c) Vergleiche die in a) und b) berechneten Werte mit den Energie- und Impulswerten eines Photons des sichtbaren Lichts.

2. a) Ein Ball wird vom Wasserstrahl eines Springbrunnens in der Schwebe gehalten. Warum fällt der Ball nicht herunter, obwohl aus dem Schwerefeld der Erde ein Impulsstrom in den Ball fließt?
b) Ein Kügelchen wird von einem nach oben gerichteten Lichtstrahl in der Schwebe gehalten. Warum fällt das Kügelchen nicht herunter, obwohl aus dem Schwerefeld der Erde ein Impulsstrom in das Kügelchen fließt?
c) Wie viele Photonen müssen pro Sekunde auf das Kügelchen aus Aufgabenteil b) treffen, wenn der Impulsstrom aus dem Schwerefeld in das Kügelchen eine Stärke von $7 \cdot 10^{-11}$ N hat? (Wellenlänge des Lichts: 800 nm.)

29.5 Photonen und Interferenz

Du hattest früher ein Experiment kennen gelernt, bei dem ein Laserstrahl auf zwei leicht gegeneinander geneigte Spiegel trifft, Abb. 29.6. Dadurch entstehen zwei Laserstrahlen, die in sehr spitzem Winkel ineinander laufen. Wenn man ein Blatt Papier in das Gebiet hält, in dem sich die beiden Strahlen durchkreuzen, sieht man auf dem Blatt ein Interferenzmuster.

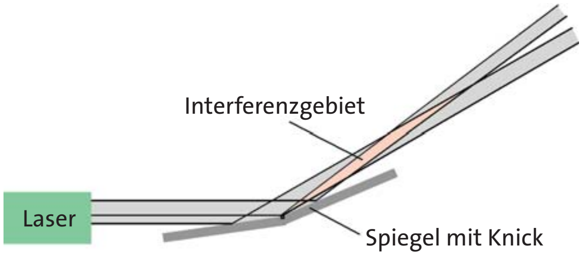


Abb. 29.6 An den gegeneinander geneigten Spiegeln teilt sich der Laserstrahl in zwei Strahlen auf, die in sehr spitzem Winkel durcheinander hindurchlaufen.

Wir wollen nun das Papier durch eine Digitalkamera ersetzen. Das Interferenzmuster entsteht jetzt auf dem Bildsensor der Kamera.

Wo der Film einen hellen Streifen hat, haben sich die beiden Lichtstrahlen gegenseitig ausgelöscht, wo ein dunkler Streifen ist, haben sie sich verstärkt.

Wir sehen jetzt aber, dass die Entstehung der Streifen nicht ganz einfach sein kann.

Ein Photon wird durch ein Pixel des Sensors absorbiert. Ein einziges Photon kann daher sicher kein Interferenzmuster erzeugen, auch wenn es Teil zweier sich durchkreuzender Laserstrahlen ist. Die einzelnen Photonen treffen scheinbar zufällig über den Sensor verteilt ein, Abb. 29.7a.

Ein Photon liefert dabei lediglich einen Beitrag zum Interferenzmuster, welches erst nach und nach entsteht, wenn sehr viele Photonen auf den Sensor fallen. Erst nachdem sehr viele Photonen eingetroffen sind, stellt sich heraus, dass die Verteilung über die Pixel nicht gleichmäßig ist. In manchen Bereichen treffen gar keine Photonen ein, während sie in anderen Bereichen gehäuft auftreten, Abb. 29.7b und c.

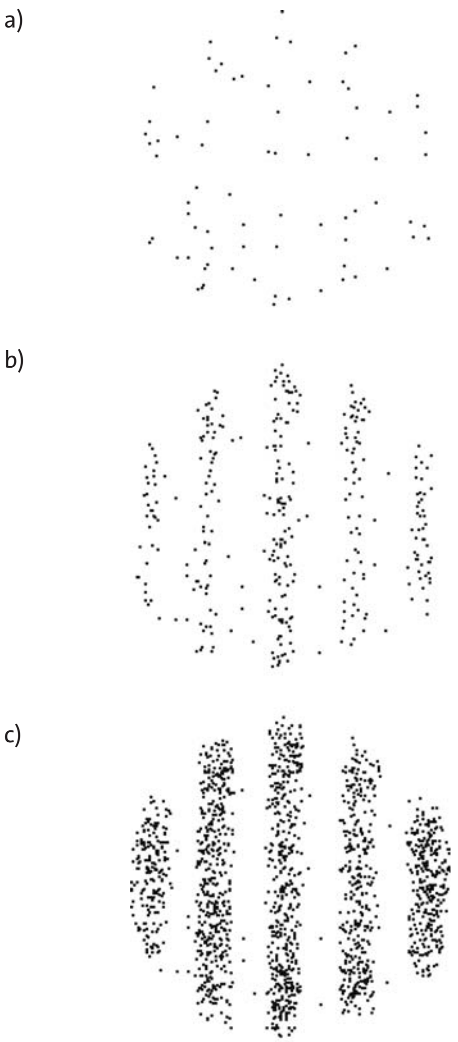


Abb. 29.7 Mit zunehmender Belichtungszeit entsteht ein Interferenzmuster.

> Ein einzelnes Photon kann auf einem Sensor kein Interferenzmuster erzeugen. Erst viele Photonen verteilen sich so, dass ein Interferenzmuster entsteht.

30 ATOME

Die Dinge um dich herum bestehen aus den unterschiedlichsten Stoffen: aus Beton, Holz, Kunststoffen, Metallen, Glas, Farbstoffen, Klebstoffen, Luft und vielen anderen mehr.

Die meisten dieser Stoffe sind ein Gemisch aus so genannten Reinstoffen. So besteht Luft überwiegend aus Stickstoff und Sauerstoff, enthält aber auch Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und verschiedene Edelgase. Man kennt mehrere Millionen verschiedene Reinstoffe. Und man weiß, dass es noch viel mehr gibt, als man kennt.

Die große Zahl der Reinstoffe kommt nun auf eine ganz einfache Art zustande.

Jede Portion eines Reinstoffs besteht aus kleinen, untereinander gleichen Teilchen, ähnlich wie ein Sack Weizen aus vielen Weizenkörnern besteht.

Unter den Reinstoffen gibt es eine kleine Gruppe von Stoffen, die eine Besonderheit haben: die etwa 100 Elemente. Die kleinsten Teilchen der Elemente sind die Atome. Es gibt so viele verschiedene Atomsorten wie es Elemente gibt.

Setzt man mehrere Atome zusammen, so erhält man ein Molekül, den Grundbaustein eines neuen Reinstoffs, der aber kein Element mehr ist.

Nun kann man Moleküle auf sehr, sehr viele verschiedene Arten bauen, ähnlich, wie man aus nur wenigen Sorten von Lego-Bausteinen sehr viele verschiedene Dinge bauen kann. So erklärt sich also die riesige Zahl verschiedener Moleküle, und damit verschiedener Reinstoffe.

Wir werden uns im Folgenden mit den Atomen befassen: Was für eine Form haben sie? Wie ist ihr innerer Aufbau? Wir werden sehen, dass man sie verformen und dadurch Energie in ihnen speichern kann.

Atome sind viel zu klein, um sie mit bloßem Auge sehen zu können, und selbst das beste Lichtmikroskop reicht nicht aus, um sie sichtbar zu machen. Es gibt aber Geräte, die dazu in der Lage sind: Abb. 30.1 zeigt einen sehr kleinen Ausschnitt aus der Oberfläche eines Stücks Silizium, aufgenommen mit einem Tunnelelektronenmikroskop. Die kleinen Buckel, die man in der Abbildung sieht, sind die Atome an der Oberfläche des Siliziumkristalls.

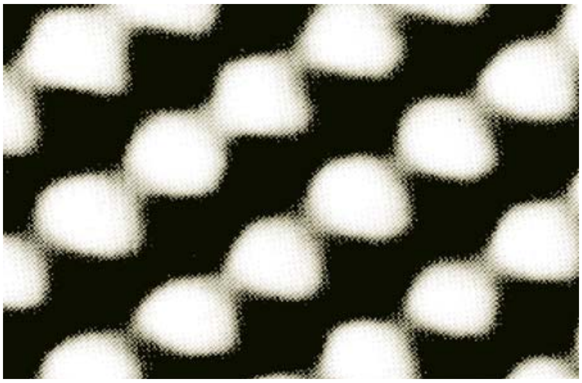


Abb. 30.1 Die Oberfläche von Silizium, aufgenommen mit einem Tunnelelektronenmikroskop

Aufgabe

1. Welche Gründe für die Existenz von Atomen kennst du oder findest du in Büchern (Internet, Chemiebücher, Lexika)?

30.1 Der Aufbau der Atome

Atome sind kugelrund. Sie bestehen aus einem sehr kleinen, schweren Kern und einer leichten und relativ großen Hülle.

Der Durchmesser des Kerns beträgt etwa ein 50 000stel des Atomdurchmessers, d. h. des Durchmessers der Hülle. Die Masse des Kerns beträgt etwa 99,9 % der Gesamtmasse des Atoms. Kern und Hülle sind elektrisch geladen: der Kern positiv, die Hülle negativ. Die Ladungen von Kern und Hülle sind dem Betrage nach gleich. Das bedeutet, dass das Atom als Ganzes elektrisch neutral ist, seine Gesamtladung ist null.

> Atome bestehen aus einem kleinen, schweren, positiv geladenen Kern und einer großen negativ geladenen Hülle.

Wahrscheinlich hast du schon gehört, dass die Atomhülle aus punktförmigen Elektronen besteht, die sich um den Kern herumbewegen. Dies ist ein Bild vom Atom, das man sich zu Anfang des 20. Jahrhunderts vom Atom machte, das aber nicht mehr den Auffassungen der modernen Physik über das Atom entspricht.

Es trifft die Sache besser, wenn du dir die Atomhülle als aus einem Stoff bestehend vorstellst, der kontinuierlich in der Umgebung des Kerns verteilt ist. Wir nennen diesen Stoff Elektronium.

Die Dichte des Elektroniums ist nicht überall dieselbe. In unmittelbarer Nähe des Kerns ist sie am größten. Mit zunehmendem Abstand vom Kern nimmt sie zunächst sehr schnell und dann immer langsamer ab. Die Atomhülle ist also kugelförmig, hat aber keinen scharfen Rand, an dem sie endet, Abb. 30.2.

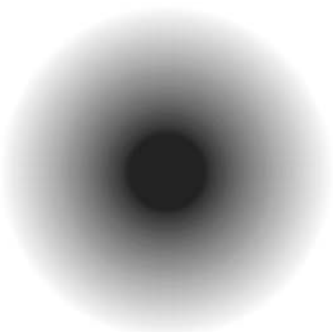


Abb. 30.2 Die Verteilung des Elektroniums im Atom

Das Elektronium des Atoms hat damit eine gewisse Ähnlichkeit mit der Lufthülle der Erde: Auch die Luft wird mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche immer dünner, und es lässt sich keine scharfe Grenze angeben, an der sie endet.

Um eine Größe des Atoms anzugeben, nehmen wir den Radius, innerhalb dessen sich 90 % des Elektroniums befindet. Die Radien der verschiedenen Atomsorten sind verschieden. Ein typischer Wert für den Radius ist 10^{-10} m.

> Die Atomhülle besteht aus Elektronium. Das Elektronium ist kugelsymmetrisch um den Kern verteilt. Seine Dichte nimmt von innen nach außen ab.

Eine überraschende Eigenschaft des Atoms tritt zutage, wenn man versucht, Elektronium aus der Hülle herauszuholen. Es soll uns im Augenblick noch nicht interessieren, wie man das machen kann. Wir stellen uns zunächst einfach vor, das Atom wäre sehr groß, sodass wir mit den Händen hineinfassen können. Wir fassen also — in Gedanken — ins Atom hinein, um eine Portion Elektronium herauszulösen. Wir erhalten eine gewisse Menge Elektronium, legen sie irgendwo ab und wiederholen die Operation: Wir greifen wieder hinein und holen eine zweite Portion heraus. Dabei stellen wir überrascht fest, dass diese Portion exakt gleich groß ist wie die erste. Wir wiederholen noch einmal, und wieder ist die Elektroniumportion genauso groß wie die beiden vorherigen. Wir machen nun eine größere Anstrengung, um zu sehen, ob man nicht doch etwas mehr herausbekommt. Wir langen viel stärker zu — und sind erfolgreich: Wir haben mehr Elektronium in den Händen. Diesmal allerdings genau die doppelte Menge der Portionen, die wir vorher erhalten hatten. Bei noch stärkerem Zulangen erhält man dreifache, vierfache … Mengen, aber nie Mengen, die dazwischen liegen. Wir versuchen nun noch, eine kleinere Menge Elektronium aus dem Atom herauszubekommen. Es gelingt aber nicht. Entweder wir bekommen eine der Portionen wie wir sie schon hatten, oder gar nichts.

Man kann also aus dem Atom nur Elektroniumportionen ganz bestimmter Größe, Elementarportionen sozusagen, herausholen — oder Vielfache davon. Wie die kleinsten Portionen des Lichts oder der chemischen Stoffe einen eigenen Namen haben, so hat auch die kleinste Portion des Elektroniums einen eigenen Namen: ein Elektron. Man nennt solche Elementarportionen allgemein auch Teilchen.

Solange man das Elektronium in der Atomhülle lässt, merkt man allerdings nichts von der Eigenschaft, dass es in Elementarportionen auftritt. In der Hülle bildet es einen kontinuierlich verteilten „Brei", es sind keine Grenzen zwischen einzelnen Portionen feststellbar.

Hier der Steckbrief eines Elektrons: Es hat eine Masse von 10^{-30} kg, eine elektrische Ladung von minus $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C und verhält sich wie ein kleiner Dauermagnet ganz bestimmter Stärke.

> Ein Elektron ist eine Elementarportion des Elektroniums. Die Elementarportionen der Stoffe nennt man auch Teilchen.

Wie die Atomhülle besteht auch der Atomkern aus einem Stoff. Im Unterschied zur Dichte des Elektroniums in der Hülle ist die Dichte dieser Kernmaterie im Kerninnern überall dieselbe, ähnlich wie die Dichte des Stahls in einer massiven Stahlkugel.

Aus dem Kern lassen sich ebenfalls nur bestimmte Portionen herausholen. Allerdings gibt es zwei etwas verschiedene Portionen, deren Namen dir wahrscheinlich schon bekannt sind: Protonen und Neutronen.

Protonen und Neutronen haben eine viel größere Masse als Elektronen, sie sind etwa 1 800-mal so schwer. Die elektrische Ladung des Protons hat denselben Betrag wie die des Elektrons, aber entgegengesetztes Vorzeichen, also $+1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Das Neutron ist ungeladen. Auch Protonen und Neutronen sind magnetisch, allerdings wesentlich schwächer als die Elektronen.

Die Werte der Größen, durch die die Elektronen, Protonen und Neutronen charakterisiert sind, sind in Tab. 30.1 noch einmal zusammengefasst.

	Masse	elektr. Ladung	magnetisch
Elektron	$0{,}9 \cdot 10^{-30}$ kg	$-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C	stark
Proton	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	$+1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C	schwach
Neutron	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	0 C	schwach

Tab. 30.1

Der Kern jedes Atoms enthält positiv geladene Protonen, die Hülle besteht aus negativ geladenem Elektronium. Die Atome als Ganzes sind aber ungeladen. Da die Ladung von Elektronen und Protonen entgegengesetzt gleich ist, können wir folgern, dass die Anzahl der Elektronen in der Hülle eines Atoms gleich der Anzahl der Protonen im Kern des Atoms sein muss.

Die Anzahl der Protonen im Kern ist das Unterscheidungskriterium für die verschiedenen Atomsorten: Wasserstoffatome haben ein Proton im Kern, Heliumatome zwei, Lithiumatome drei usw. Im Periodensystem (siehe Tab. 33.3 auf S. 438) sind die Atome nach der Zahl der Protonen im Kern, der Ordnungszahl, aufgereiht.

> Die Kerne der Atome enthalten eine für jede Atomsorte typische Anzahl von Protonen.

Elektronen, Protonen und Neutronen sind magnetisch. Andererseits sind, mit Ausnahme von Eisen, praktisch alle Stoffe, die in unserer Umgebung vorkommen, unmagnetisch. Und auch Eisen ist nur in Sonderfällen magnetisch (Eisennägel etwa sind es in der Regel nicht).

Der Grund dafür ist, dass sich die Wirkungen von Magneten gegenseitig kompensieren können. So heben sich bei etwa einem Viertel aller Atomsorten, darunter alle Edelgasatome, die magnetischen Wirkungen der Elektronen in den Atomen gegenseitig auf. (Die magnetischen Wirkungen von Protonen und Neutronen sind ohnehin so gering, dass sie keinen merklichen Beitrag zum Magnetismus der Materie liefern.) Derartige Atome sind also magnetisch neutral, und folglich auch diejenigen Stoffe, die aus solchen Atomen bestehen.

Bei den restlichen drei Vierteln der Atomsorten sind zwar die einzelnen Atome magnetisch. Dennoch sind auch Stoffe, die aus diesen Atomen bestehen, meist unmagnetisch: Die Atome schließen sich zu Molekülen zusammen und kompensieren dadurch ihre magnetischen Wirkungen. Wasserstoff etwa, dessen Atome nur je ein Elektron in der Hülle haben und damit magnetisch sind, kommt in der Natur nur molekular vor, d. h., er besteht aus H_2-Molekülen. Die magnetischen Wirkungen der beiden Elektronen jedes Moleküls kompensieren sich aber, sodass das Molekül als Ganzes magnetisch neutral ist. Moleküle, bei denen sich die magnetischen Wirkungen der beteiligten Atome nicht kompensieren, schließen sich häufig zu größeren, nicht magnetischen Molekülgruppen zusammen, sodass sich die magnetischen Wirkungen dieser Gruppen nach außen wieder aufheben.

Nur in Ausnahmefällen, nämlich dann, wenn magnetische Atome oder Moleküle in Materialien so angeordnet sind, dass sich ihre magnetischen Wirkungen nicht kompensieren, ergibt sich eine Magnetisierung des Materials. In der Natur sind derartige Materialien sehr selten, sie lassen sich aber leicht herstellen. Aus solchen Materialien bestehen Dauermagneten.

Die magnetischen Wirkungen der Elektronen können sich kompensieren
- innerhalb der Atomhülle;
- innerhalb eines Moleküls;
- innerhalb von Molekülgruppen.

Aufgabe

1. Wenn man ein Atom so weit vergrößern würde, dass es die Größe der Erde hätte (Durchmesser der Erde ca. 12 000 km), welchen Durchmesser hätte dann der Kern?

30.2 Größe und Dichte der Atomhülle

Die Menge an Elektronium in der Hülle eines Atoms nimmt mit steigender Protonenzahl zu. So enthält die Hülle eines Quecksilberatoms (Ordnungszahl 80) achtzig Mal so viel Elektronium wie die Hülle eines Wasserstoffatoms. Die Erwartung liegt nahe, dass Quecksilberatome viel größer sind als Wasserstoffatome. Tatsächlich sind aber Wasserstoff- und Quecksilberatom fast gleich groß.

Das bedeutet, dass die Dichte des Elektroniums in einem Quecksilberatom viel höher sein muss als in einem Wasserstoffatom.

Wir wollen in Gedanken die Atome der verschiedenen chemischen Elemente nach und nach aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufbauen und dabei danach fragen, wie sich die Größe und die Dichte der Atome ändert. Da die Neutronen keinen Einfluss auf die Größe der Atome haben, erwähnen wir sie im Folgenden nicht mehr. Wir beginnen mit dem Wasserstoffatom, das aus einem Proton als Kern und einer Elementarportion Elektronium als Hülle besteht.

Wir erhöhen die Zahl der Protonen um eins und erhalten ein positiv geladenes Heliumion. Da jetzt zwei positiv geladene Protonen an dem negativ geladenen Elektronium ziehen, rückt das Elektronium näher an den Kern heran. Das Heliumion ist also kleiner als das Wasserstoffatom. Das bedeutet, dass die Dichte des Elektroniums beim Heliumion größer ist.

Um zum Heliumatom zu kommen, fügen wir als Nächstes ein Elektron hinzu. Dadurch wird

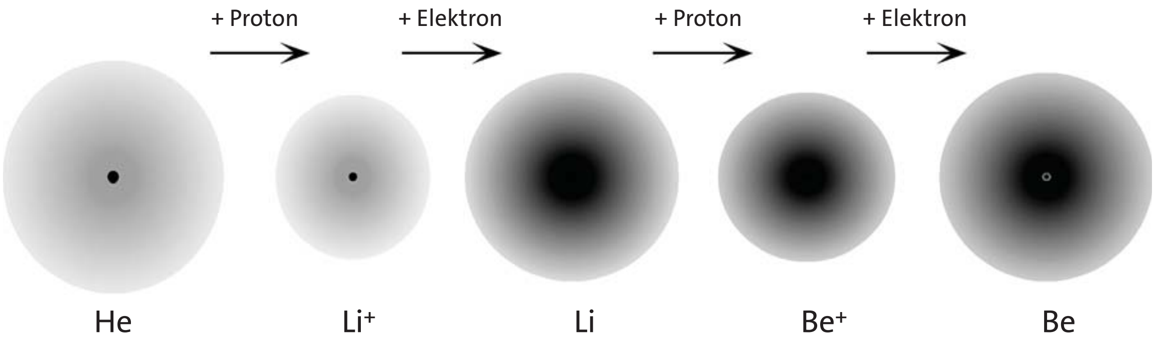


Abb. 30.3 Wir bauen schwere Atome auf, indem wir abwechselnd ein Proton und ein Elektron hinzufügen. (Es werden auch Neutronen hinzugefügt. Diese haben aber keinen Einfluss auf die Größe der Atome bzw. Ionen.)

die Hülle aufgebläht wie bei einem Luftballon, in den man zusätzliche Luft hineinbläst. Die zwei Elektroniumportionen im Heliumatom beanspruchen mehr Platz als die eine Portion im Heliumion — das Heliumatom ist größer als das Ion.

Hinzufügen eines weiteren Protons ergibt ein positiv geladenes Lithiumion, Abb. 30.3, und wiederum schrumpft dabei das Elektronium zusammen. Auch die Vervollständigung der Hülle zum Lithiumatom hat denselben Effekt wie beim Helium: Die Hülle mit drei Elektronen braucht mehr Platz, das Lithiumatom ist größer als das Lithiumion.

Bei diesem schrittweisen Aufbau der Atome machen sich also zwei gegenläufige Tendenzen bemerkbar: Das Hinzufügen eines Protons hat eine Verkleinerung der Hülle zur Folge, während das Hinzufügen eines Elektrons zu einer Vergrößerung führt.

In Abb. 30.4 sind die Radien der Atome über der Protonenzahl aufgetragen.

Man sieht, dass manchmal die Tendenz zur Verkleinerung überwiegt und manchmal die Tendenz zur Vergrößerung. Der Radius der meisten Atome weicht aber nicht sehr stark von dem typischen Wert von etwas mehr als 10^{-10} Metern ab. Die größten Atome sind etwa doppelt so groß, die kleinsten halb so groß.

> Der Radius der meisten Atome weicht nur wenig von 10^{-10} Meter ab. Sehr große Unterschiede gibt es dagegen bei der Dichte des Elektroniums in den Atomhüllen.

30.3 Die verschiedenen Zustände der Atome

Ein aufgeblasener Luftballon hat eine bestimmte Form. Diese Form kann man verändern, indem man gegen den Ballon drückt oder an ihm zieht. Lässt man ihn wieder los, so geht er zurück in seinen ursprünglichen Zustand. Seine normale Form hat er nur, wenn man ihn in Ruhe lässt.

Bei Atomen ist es ähnlich. Alles bisher über Form und Größe der Atome Gesagte gilt nur, solange man die Atome „in Ruhe lässt". Es darf sich nichts in der Nähe befinden, was das Atom verformen könnte: keine anderen Atome und keine elektrischen oder magnetischen Felder. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, hat ein Atom seine natürliche Kugelform.

Die Bedingung, dass sich kein anderes Atom in der Nähe befindet, ist bei gasförmigen Stoffen erfüllt, denn die einzelnen Atome haben einen relativ großen Abstand voneinander. Wir betrachten im Folgenden solche freien Atome. Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen liegen die Atome dicht an dicht. Mit der Form der Atome in diesen Stoffen werden wir uns in einem späteren Kapitel befassen.

Was man für eine Verformung immer braucht — beim Luftballon wie beim Atom — ist Energie.

Einem Luftballon könnte man die Energie auch auf andere Weise zuführen als durch Drücken: Man könnte z. B. einen Tennisball gegen ihn werfen. Der Tennisball verändert während des Aufpralls die Form des Luftballons. Die

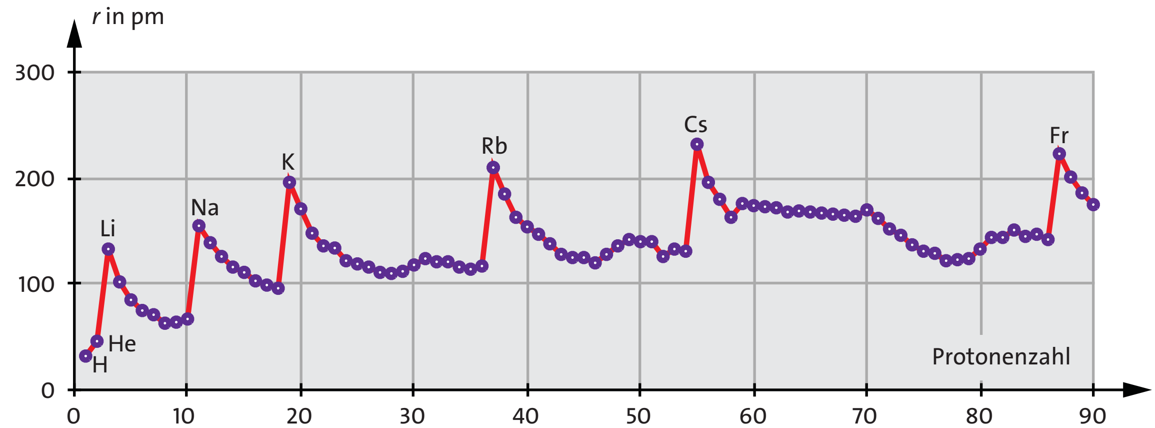


Abb. 30.4 Wir bauen schwere Atome auf, indem wir abwechselnd ein Proton und ein Elektron hinzufügen. (Es werden auch Neutronen hinzugefügt. Diese haben aber keinen Einfluss auf die Größe der Atome bzw. Ionen.)

Energie für die Verformung kommt in diesem Fall vom Tennisball, der beim Aufprall abgebremst wird. Je schneller der Tennisball vor dem Aufprall war, d. h., je mehr Energie er hatte, umso stärker wird der Luftballon verformt. Der Luftballon behält die Verformung natürlich nicht bei, sondern geht sofort wieder zurück in seine ursprüngliche Form, wobei er den Tennisball wegkatapultiert.

Atome kann man auf ganz ähnliche Art verformen: indem man andere Teilchen dagegenschießt — zum Beispiel Photonen oder Elektronen.

Die Atome verhalten sich dabei aber sehr merkwürdig. Sie können nämlich in bestimmte Formen „einrasten". Wenn ein Atom durch den Aufprall eines anderen Teilchens in eine solche Form gebracht wird, behält es diese Form zunächst bei. Erst nach einer gewissen Zeit springt es wieder in den unverformten Zustand zurück. Abb. 30.5 zeigt einige der Formen, in die ein Wasserstoffatom einrasten kann.

Von einem Atom, das in eine der möglichen Formen eingerastet ist, sagt man, es befinde sich in einem angeregten Zustand. Den Zustand mit unverformter Hülle (Abb. 30.5a) nennt man den Grundzustand des Atoms. Der Vorgang der Verformung, also der Übergang vom Grundzustand in einen angeregten Zustand, heißt Anregung.

> Atome können verformt werden. Manche Verformungen behalten die Atome bei.

Wenn ein Atom in eine dieser Formen einrastet, speichert es die für die Formänderung aufgewendete Energie. Da das Atom nur ganz bestimmte Formen beibehält, kann es auch nur ganz bestimmte Energiemengen speichern. In anderen Worten: Die Energie des Atoms kann nur bestimmte Werte annehmen. In Abb. 30.6 ist die Energieleiter eines Atoms dargestellt.

Wir sehen hier davon ab, dass man ein Atom auch in Bewegung setzen und damit seine Energie nach Belieben verändern kann. Wir betrachten also ruhende Atome. Die Energie eines Atoms hat den niedrigsten Wert, wenn sich das Atom im Grundzustand befindet. Die Energiewerte in den angeregten Zuständen liegen um den Betrag höher, der bei der Anregung aufgenommen wird.

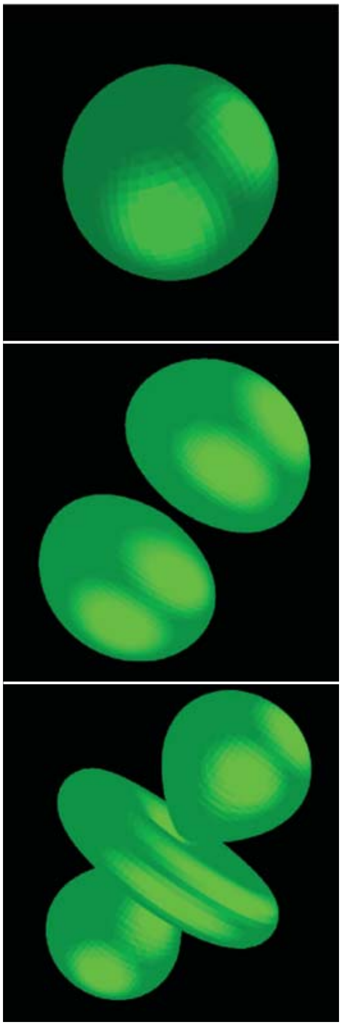


Abb. 30.5 (a) Wasserstoffatom im Grundzustand. (b) und (c) Wasserstoffatom in zwei angeregten Zuständen

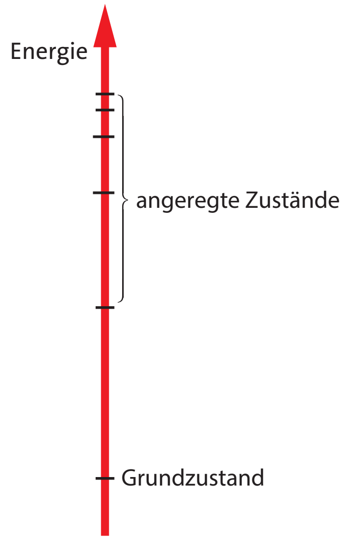


Abb. 30.6 Energieleiter eines Atoms: Die Energie eines Atoms kann nur bestimmte Werte annehmen.

> Ein ruhendes Atom kann nur ganz bestimmte Energiemengen speichern.

Wie stellt man es nun konkret an, ein Atom anzuregen? Man muss in jedem Fall irgendwelche anderen Teilchen gegen das Atom schießen: Photonen, Elektronen, Ionen oder andere Atome. Je nachdem, was für Teilchen man verwendet, ergeben sich aber einige Besonderheiten.

30.4 Die Anregung von Atomen mit Photonen

Wenn man ein Atom mit einem Photon anregen will, muss die Energie des Photons genau gleich der Energie sein, die das Atom braucht, um aus dem Grundzustand in den angeregten Zustand zu gelangen. Hat das Photon weniger Energie, so kann das Atom selbstverständlich nicht angeregt werden, denn die Energie reicht nicht aus. Hat das Photon mehr Energie, ist die Anregung aber auch nicht möglich.

Wir beschreiben ein konkretes Experiment. Als anzuregende Atome nehmen wir Natriumatome. Mit Natrium lässt sich besonders gut beobachten, was passiert. Natrium ist normalerweise ein fester Stoff. Durch Erhitzen kann man aber leicht Natriumdampf herstellen.

Die Photonen beschaffen wir uns mit einer Lampe, die einen Strahl weißen Lichts erzeugt, also ein Gemisch aller Lichtsorten mit Wellenlängen von 400 bis 800 nm. Da die Energie eines Photons von der Wellenlänge des Lichts abhängt, haben wir damit ein Gemisch aus Photonen verschiedenster Energien.

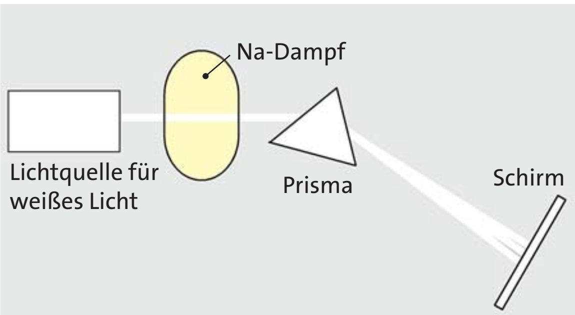


Abb. 30.7 Licht einer Glühlampe durchläuft Natriumgas und wird danach spektral zerlegt.

Der Lichtstrahl aus der Lampe wird nun auf das Natriumgas geschickt, Abb. 30.7. Der allergrößte Teil der Photonen hat nun aber eine Energie, die keiner Anregung entspricht. Diese Photonen fliegen unbehelligt von den Atomen durch das Gas hindurch. Nur ein sehr kleiner Bruchteil der Photonen hat eine passende Energie, und nur diese werden von den Atomen absorbiert. Sie geben ihre Energie an die Atome ab und verschwinden dabei, während die Atome in einen angeregten Zustand übergehen.

Die absorbierten Photonen fehlen nach dem Durchlaufen des Gases im Lichtstrahl. Da es sich aber nur um einen sehr geringen Teil des Lichts handelt, merkt man dem Lichtstrahl zunächst nichts an. Wir wollen daher den Lichtstrahl, nachdem er das Natriumgas durchlaufen hat, genauer untersuchen: Wir machen eine spektrale Zerlegung des Lichts.

Ein Prisma lenkt Licht kleiner Wellenlänge stärker ab als Licht großer Wellenlänge. Wir lassen einen dünnen Strahl des Lichts, das das Natriumgas durchlaufen hat, auf ein Prisma fallen. Hinter dem Prisma wird in größerer Entfernung ein weißer Schirm aufgestellt. Das Licht trifft nun, nach Wellenlängen sortiert, auf diesen Schirm. Da Licht unterschiedlicher Wellenlänge in unseren Augen unterschiedliche Farbeindrücke hervorruft, sieht man auf dem Schirm die Farben des Regenbogens.

Wenn man nun sehr genau hinschaut, stellt man fest, dass der Schirm an einer bestimmten Stelle, im Bereich des gelben Lichts, dunkel bleibt, Abb. 30.8: Es fehlt das Licht einer bestimmten Wellenlänge. Es fehlt genau diejenige Lichtsorte, deren Photonen von den Natriumatomen absorbiert worden sind. Mit einem Spektrometer findet man auch die Wellenlänge des fehlenden Lichts: $\lambda = 589$ nm.

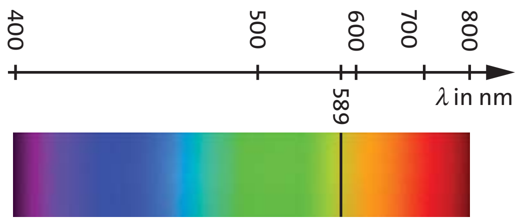


Abb. 30.8 Im Spektrum fehlt Licht der Wellenlänge 589 nm.

Die Energie der absorbierten Photonen ergibt sich daraus zu

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js} \cdot 3 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s}}{589 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}} \approx 0{,}3 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{J}.$$

Das ist zugleich die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem niedrigsten angeregten Zustand der Natriumatome, Abb. 30.9. Durch die Absorption eines „gelben" Photons springt ein Natriumatom auf seiner Energieleiter von der untersten auf die nächst höhere Sprosse.

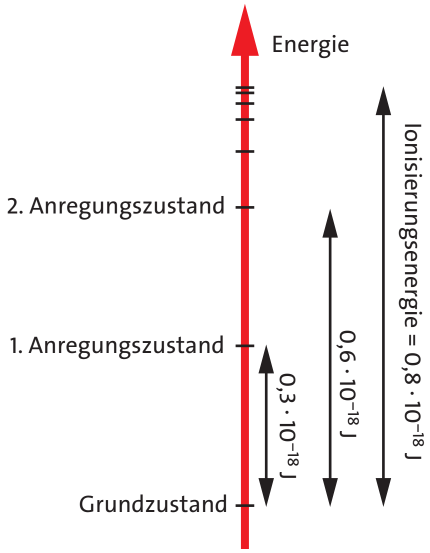


Abb. 30.9 Energiedifferenzen zwischen verschiedenen Sprossen der Energieleiter des Natriumatoms.

In einem früheren Kapitel hatten wir gesehen, dass sich Licht wie ein Stoff verhält. So lässt sich auch die Absorption von Licht als Reaktion von Stoffen beschreiben. Im Fall unseres Experiments hat die Reaktionsgleichung die Form

$$\mathrm{Na} + \gamma \rightarrow \mathrm{Na}^*$$

In Worten ausgedrückt: Natrium reagiert mit Licht zu dem mit Na^* bezeichneten Stoff. Dieser Stoff besteht aus Natriumatomen, die sich im ersten angeregten Zustand befinden. Das mit Na bezeichnete Natrium besteht aus Natriumatomen im Grundzustand.

Photonen der Energie $E = 0{,}3 \cdot 10^{-18}$ J sind nicht die einzigen, die von den Natriumatomen absorbiert werden. Die Natriumatome können in noch viele andere angeregte Zustände gebracht werden. Deshalb gibt es auch weitere Photonensorten, die absorbiert werden können. Die Energien dieser Photonen sind größer als die der zuvor betrachteten, die Wellenlängen kleiner.

So absorbieren Natriumatome beispielsweise auch Photonen mit einer Energie von $0{,}6 \cdot 10^{-18}$ J, Abb. 30.9. Das entspricht einer Wellenlänge von 330 nm, es handelt sich also um ultraviolettes Licht. Wir fassen zusammen:

> Photonen mit passender Energie können Atome anregen. Die Photonen werden dabei absorbiert.

Wir haben gesehen, dass der größte Teil der Photonen des sichtbaren Lichts von den Natriumatomen unbehelligt durchgelassen wird. Dasselbe gilt für alle anderen gasförmigen Stoffe. Ihre Atome bzw. Moleküle absorbieren nur sehr wenige oder gar keine sichtbaren Photonen. Das erklärt eine Eigenschaft von Gasen, die du gut kennst:

> Gase sind durchsichtig.

Je mehr Energie einem Atom mit einem Photon zugeführt wird, desto stärker wird das Atom verformt. Bei sehr hohen Photonenenergien kann die Hülle nun so stark verformt werden, dass sich eine Portion des Elektroniums vom Atom ganz ablöst. Bei Natriumatomen ist das der Fall, wenn die Photonen mehr als $0{,}8 \cdot 10^{-18}$ J haben. Da das abgelöste Elektron negativ geladen ist, ändert sich die elektrische Ladung der Hülle. Aus dem Natriumatom wird ein positiv geladenes Natriumion. Man nennt diesen Vorgang Ionisierung. Die Energie, die man mindestens braucht, um ein Atom zu ionisieren, heißt Ionisierungsenergie, Abb. 30.9. Auch der Vorgang der Ionisierung lässt sich als Reaktion beschreiben:

$$\mathrm{Na} + \gamma \rightarrow \mathrm{Na}^+ + \mathrm{e}.$$

Dabei bezeichnet Na^+ den Stoff, der aus positiv geladenen Natriumionen besteht; e ist das Symbol für das Elektronium.

Aufgaben

1. Natriumatome können mit Licht der Wellenlänge λ = 285 nm vom Grundzustand in den dritten angeregten Zustand gebracht werden. Berechne die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem drittem angeregten Zustand.
2. Welche Wellenlänge darf Licht, mit dem man Natriumatome ionisieren möchte, höchstens haben? Um was für Licht handelt es sich dabei?

30.5 Die Rückkehr in den Grundzustand

Jede Reaktion kann vorwärts und rückwärts ablaufen — so auch die Reaktion von Natrium mit Licht zu angeregtem Natrium. Das heißt, es gibt auch eine Reaktion mit der Reaktionsgleichung

$$Na^* \rightarrow Na + \gamma\,.$$

Beim Rückgang eines angeregten Natriumatoms in den Grundzustand wird ein Photon emittiert.

Dass dies tatsächlich der Fall ist, können wir an dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Experiment sehen. Wenn man den durchstrahlten Natriumgasbehälter genau betrachtet, sieht man ein schwach gelbliches Leuchten. Eine Untersuchung des Lichts mit dem Spektrometer zeigt, dass es dieselbe Wellenlänge hat wie das Licht, das auf dem Schirm fehlt. Die Natriumatome geben also die Energie, die sie bei der Absorption eines Photons bekommen, wieder ab, indem sie ein gleichartiges Photon erzeugen.

Die Emission erfolgt aber nicht nur in die Richtung, in die sich die absorbierten Photonen bewegt haben, sondern nach allen Seiten, Abb. 30.10. Deshalb fehlen die Photonen, die der Anregung entsprechen, in dem durchlaufenden Strahl fast vollständig.

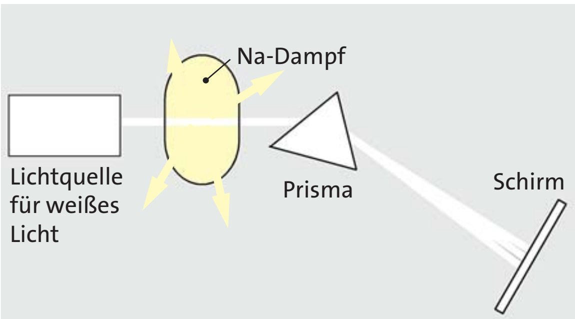


Abb. 30.10 Das angeregte Natrium strahlt nach allen Seiten.

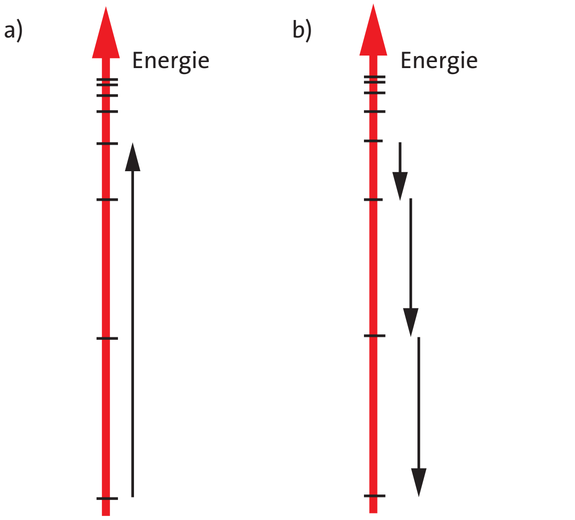


Abb. 30.11 Energiedifferenzen zwischen verschiedenen Sprossen der Energieleiter des Natriumatoms.

Nach der Absorption eines „gelben“ Photons befindet sich ein Natriumatom im niedrigsten angeregten Zustand. Durch die Absorption eines energiereicheren Photons kann es aber auch in einen höher angeregten Zustand gebracht werden, Abb. 30.11a.

Beim Rückgang in den Grundzustand hat das Atom nun mehrere Möglichkeiten: Es kann direkt in den Grundzustand zurückspringen und dabei ein Photon emittieren, das dieselbe Energie hat wie das bei der Anregung absorbierte. Es kann die Energieleiter aber auch sprossenweise hinuntersteigen und dabei mehrere Photonen mit kleinerer Energie nacheinander emittieren, Abb. 30.11b.

> Beim Rückgang in den Grundzustand emittiert ein angeregtes Atom ein Photon oder mehrere Photonen.

30.6 Die Halbwertszeit der angeregten Zustände

Wir hatten gesagt, ein Atom verweilt eine gewisse Zeit in einem angeregten Zustand und springt dann irgendwann wieder in den Grundzustand zurück. Wie lange bleibt es aber im angeregten Zustand?

Man könnte denken, dass sich das leicht feststellen lässt: Man schaltet die Lichtquelle in dem Experiment von Abb. 30.7 ab und sieht nach, wie lange das Gas noch gelbes Licht abgibt. Tatsächlich beobachtet man aber das Folgende: Sobald man das weiße Licht abschaltet, hört auch das gelbe Leuchten auf. Daraus muss man schließen, dass die Verweilzeit im angeregten Zustand sehr kurz ist — so kurz, dass wir sie durch einfaches Betrachten nicht wahrnehmen können. Eine genaue Messung ergibt, dass die „Lebensdauer“ der angeregten Zustände von Atomen ungefähr 10^{-8} Sekunden beträgt. Sie ist also, gemessen an Zeitintervallen, mit denen wir es sonst im Leben zu tun haben, sehr, sehr kurz.

Mit dieser Lebensdauer hat es aber noch eine besondere Bewandtnis. Wir stellen uns vor, wir regen eine große Menge von Atomen, sagen wir 100 000 Stück, zu einem Zeitpunkt t_0 an. Ist nun die Lebensdauer ihres angeregten Zustands abgelaufen, so könnte man denken, springen sie alle, wie auf Kommando, in den Grundzustand zurück. Tatsächlich verhalten sich die Atome aber ganz anders.

Wenn man ein einzelnes Atom betrachtet, so kann man gar nicht voraussagen, wann es in den Grundzustand zurückspringen wird. Es kann sofort nach der Anregung sein, und es kann recht lange dauern. Man kann dagegen sehr gut sagen, was die ganze Gruppe von 100 000 Atomen macht. Eine bestimmte Zeit nach t_0, sagen wir $2 \cdot 10^{-8}$ s später, ist etwa die Hälfte aller Atome, also 50 000, in den Grundzustand zurückgegangen, die anderen 50 000 noch nicht. Nach weiteren $2 \cdot 10^{-8}$ s ist von den 50 000 Atomen, die im angeregten Zustand geblieben waren, wieder die Hälfte in den Grundzustand gesprungen, sodass noch 25 000 im angeregten Zustand zurückbleiben. Nach weiteren $2 \cdot 10^{-8}$ s ist wieder die Hälfte der noch übrigen angeregten Atome in den Grundzustand übergegangen, sodass noch 12 500 im angeregten Zustand bleiben usw. In Abb. 30.12 ist die Anzahl der Atome, die sich noch im angeregten Zustand befinden, über der Zeit aufgetragen. Man sagt, die Anzahl der Atome im angeregten Zustand nimmt exponentiell ab.

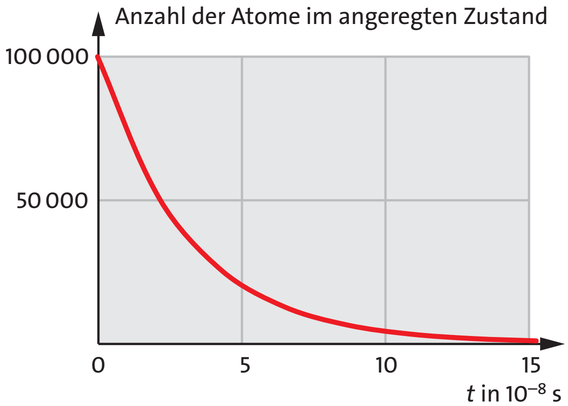


Abb. 30.12 Anzahl der Atome im angeregten Zustand als Funktion der Zeit

Man nennt die Zeit, in der die Zahl der Atome im angeregten Zustand jeweils auf die Hälfte abnimmt, die Halbwertszeit. In dem gerade diskutierten Fall wäre die Halbwertszeit $2 \cdot 10^{-8}$ s.

Noch einmal zurück zu einem einzelnen Atom in einem angeregten Zustand. Wir hatten gesagt, dass es nicht möglich ist, vorauszusagen, wann das Atom in den Grundzustand zurückspringt. Das bedeutet aber nicht, dass wir gar nichts zu seinem Übergang in den Grundzustand sagen können. Wir können nämlich die folgende Aussage machen: Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Atom in den nächsten $2 \cdot 10^{-8}$ s in den Grundzustand zurückgeht, beträgt 0,5 oder 50 %.

Der genaue Wert der Halbwertszeit ist für die verschiedenen Atomsorten verschieden, und für ein bestimmtes Atom ist er noch für jeden angeregten Zustand anders. 10^{-8} Sekunden ist ein typischer Wert, von dem die Halbwertszeit in den meisten Fällen nicht sehr stark abweicht.

Eine Zeit von $2 \cdot 10^{-8}$ s mag dir wegen ihrer Kürze als kaum erwähnenswert erscheinen. Für Physiker, die sich mit Atom- und Kernphysik beschäftigen, sind aber noch viel kürzere Zeitspannen etwas durchaus Normales, und es ist auch möglich, solche Zeiten zu messen.

Vorgänge, bei denen etwas exponentiell abnimmt, trifft man in der Natur recht häufig an. Ein anderes Beispiel ist das Licht, das in das Wasser eines Sees eindringt. Das Wasser absorbiert Licht, und zwar umso stärker, je trüber das Wasser ist.

Nehmen wir an, dass bei einem See, dessen Wasser gleichmäßig trüb sein soll, in 1 Meter

30 ATOME

Wassertiefe noch die Hälfte des Lichts ankommt. Man könnte vermuten, dass der nächste Meter Wasser die restliche Hälfte Licht absorbiert. Tatsächlich stellt man fest, dass 2 Meter unter der Wasseroberfläche noch ein Viertel der ursprünglichen Lichtmenge ankommt, in 3 Meter Tiefe noch ein Achtel usw.

Ein weiteres Beispiel für eine exponentielle Abnahme stellt der Luftdruck in der Atmosphäre über der Höhe dar. In 5 km Höhe beträgt der Druck noch die Hälfte des Drucks an der Erdoberfläche, in 10 km Höhe ein Viertel, in 15 km Höhe ein Achtel usw.

> Die Zahl der Atome in einem angeregten Zustand nimmt exponentiell ab. Die Halbwertszeit sagt uns, wann die Anzahl der Atome im angeregten Zustand auf die Hälfte abgenommen hat. Ein typischer Wert der Halbwertszeit ist 10^{-8} Sekunden. Wann ein bestimmtes angeregtes Atom ein Photon emittiert, lässt sich nicht vorhersagen.

Es lässt sich auch nicht vorhersagen, ob ein Atom, das sich in einem höher angeregten Zustand befindet, direkt in den Grundzustand zurückspringt oder die Energieleiter sprossenweise hinuntersteigt. Aber auch hier lassen sich Wahrscheinlichkeiten angeben. Wir betrachten ein Atom, das sich im zweiten angeregten Zustand befindet. Es hat zwei Möglichkeiten, in den Grundzustand zurückzugehen: entweder über den ersten angeregten Zustand oder direkt. Jede der beiden Möglichkeiten findet mit einer ganz bestimmten Wahrscheinlichkeit statt, z. B. die eine mit einer Wahrscheinlichkeit von 35 %, die andere mit 65 %. (Beide zusammen müssen 100 % ergeben.) Hat man also 100 000 Atome in diesem angeregten Zustand, so werden etwa 35 000 den einen Weg nehmen und 65 000 den anderen.

30.7 Die Anregung von Atomen mit Elektronen

Zur Anregung von Atomen kann man außer Photonen auch andere Teilchen verwenden, z. B. Elektronen, Ionen, Protonen, Atome und Moleküle. Da sehr häufig Elektronen benutzt werden, befassen wir uns hier noch mit dieser Möglichkeit.

Damit ein Elektron ein Atom anregen kann, braucht es — zusätzlich zu seiner Ruhenergie — diejenige Energiemenge, die für die Anregung erforderlich ist. Man kann nun die Energie eines Elektrons leicht erhöhen, indem man es in schnelle Bewegung versetzt, d. h., mit Impuls lädt, denn zusammen mit dem Impuls bekommt es auch Energie. Dieses Laden des Elektrons mit Impuls und Energie ist nicht schwierig.

Man braucht die Elektronen nur in ein elektrisches Feld zu bringen. Da Elektronen elektrische Ladung tragen, zieht das Feld an ihnen. Impuls und Energie der Elektronen nehmen zu. Wenn nun solche schnellen Elektronen auf Atome treffen, werden die Atome verformt und können in angeregte Zustände gelangen.

Hat das Elektron mehr Energie bekommen, als für eine Anregung nötig ist, nimmt es die überschüssige Energie nach dem Zusammenprall mit dem Atom wieder mit. Es unterscheidet sich also in dieser Eigenschaft von den Photonen. Die Photonen verschwinden ja bei der Anregung. Es gibt deshalb auch niemanden, der die übrige Energie aufnehmen kann.

> Atome können mit schnellen Elektronen angeregt werden.

Auch dieser Vorgang lässt sich als Reaktion beschreiben. Zum Beispiel kann Natrium mit Elektronium reagieren. Das Symbol für das Elektronium ist e; das beschleunigte, mit Energie beladene Elektronium bezeichnen wir mit e'. Die Reaktionsgleichung hat also die Form

$$\mathrm{Na} + \mathrm{e'} \rightarrow \mathrm{Na}^* + \mathrm{e}.$$

Wenn ein Elektron mir sehr viel Energie (und Impuls) auf ein Atom trifft, kann das Atom so stark verformt werden, dass sich eine Portion Elektronium von der Atomhülle ablöst. Das Atom wird ionisiert:

$$\mathrm{Na} + \mathrm{e'} \rightarrow \mathrm{Na}^+ + 2\,\mathrm{e}.$$

30.8 Gase als Lichtquellen

Eine der am häufigsten verwendeten künstlichen Lichtquellen ist die Leuchtröhre.

Der Hauptvorteil dieser Lampen gegenüber den Glühlampen ist ihr geringer Energiebedarf. Eine gewöhnliche Glühlampe benötigt vierbis fünfmal so viel Energie wie eine Leuchtröhre, um dieselbe Lichtmenge zu erzeugen. Außerdem ist die Lebensdauer der Leuchtröhren viel höher.

In einer Glühlampe leuchtet ein Metalldraht, der durch einen elektrischen Strom zum Glühen gebracht wird. In einer Leuchtröhre leuchtet ein Gas. Wie das Gas zum Leuchten gebracht wird, können wir uns mithilfe unserer Kenntnisse über die Anregung von Atomen klar machen.

Das Gas befindet sich in einer geschlossenen Glasröhre. An jedem Ende der Glasröhre ist eine Metallelektrode angebracht, Abb. 30.13. Eine der Elektroden wird elektrisch negativ aufgeladen, die andere positiv. Die negativ geladene Elektrode wird außerdem erhitzt. Das hat zur Folge, dass sie Elektronen abgibt. (Auch feste Stoffe bestehen zum großen Teil aus Elektronium. Durch Erhitzen kann das Elektronium so stark verformt werden, dass sich Elektronen vom Feststoff ablösen.) Da die Elektronen negativ geladen sind, werden sie von dem elektrischen Feld zwischen den beiden Metallelektroden zur positiven Elektrode gezogen.

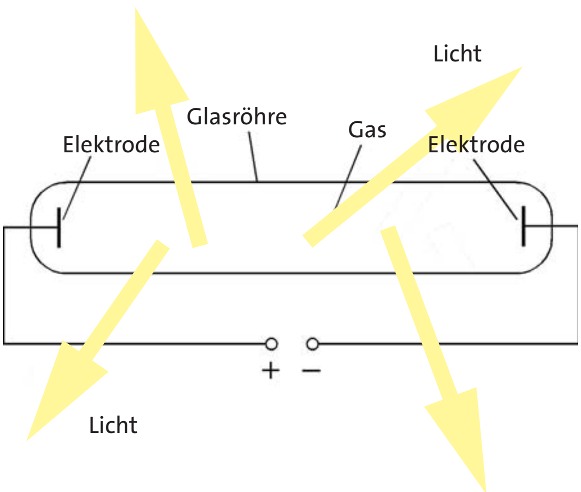


Abb. 30.13 Leuchtröhre

Auf dem Weg dorthin treffen sie auf Atome. Dabei passiert zweierlei:

(1) Atome, die von schnellen Elektronen getroffen werden, werden ionisiert, d. h., es entstehen weitere Elektronen.

(2) Atome, die von langsameren Elektronen getroffen werden, werden angeregt.

Die zusätzlichen Elektronen, die man im Fall (1) erhält, werden wiederum vom Feld beschleunigt, können weitere Atome ionisieren usw. Ausgehend von den Elektronen, die die Metallelektrode abgibt, werden also in der ganzen Leuchtröhre große Mengen Elektronen erzeugt.

Dadurch nimmt auch die Häufigkeit von (2) zu, d. h., es werden viele Atome durch den Aufprall von Elektronen angeregt. Die angeregten Atome emittieren beim Rückgang in den Grundzustand Photonen: Das Gas leuchtet.

> In Leuchtröhren werden Atome mit Elektronen angeregt. Beim
> Rückgang in den Grundzustand emittieren die Atome Photonen.

Fußgängerüberwege, Tunnels und Straßenkreuzungen werden häufig mit Leuchtröhren beleuchtet, die Natriumdampf enthalten. Die Erzeugung von Licht in einer solchen Natriumlampe können wir durch die bereits bekannten Reaktionen

$$\mathrm{Na} + e' \rightarrow \mathrm{Na}^* + e$$
$$\mathrm{Na}^* \rightarrow \mathrm{Na} + \gamma$$

beschreiben. Da Natriumatome „gelbe" Photonen emittieren, entsteht das typische gelbe Licht der Natriumlampen.

Verglichen mit anderen Leuchtröhren verbrauchen Natriumlampen am wenigsten Energie. Der Nachteil dieser Lampen ist ihr Spektrum. Da sie nur Licht einer einzigen Wellenlänge emittieren, erscheinen die von ihnen beleuchteten Gegenstände alle mit derselben Farbe: Alles erscheint in einem mehr oder weniger hellen Gelb. Um diesen Effekt abzuschwächen, enthalten Natriumlampen oft noch Zusätze von anderen Gasen, die Licht anderer Wellenlängen emittieren. Dadurch wird die Farbwiedergabe etwas verbessert.

Ein etwas anderer Typ von Lichtquellen sind die Leuchtstoffröhren. Du kennst sie gut, denn sicher werden sie auch in deiner Schule zur Beleuchtung der Klassenzimmer benutzt. Auch die Energiesparlampen sind Leuchtstoffröhren.

Das Gas, das hier mit Elektronen angeregt wird, ist Quecksilberdampf. Die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem ersten angeregten Zustand ist etwa $0{,}8 \cdot 10^{-18}$ J. Photonen dieser Energie entsprechen Licht mit einer Wellenlänge von etwa 250 nm. Der Quecksilberdampf emittiert also zunächst unsichtbares UV-Licht. Die Glasröhre, in der sich das Quecksilber befindet, ist aber auf der Innenseite mit einem weißen Stoff, dem so genannten Leuchtstoff beschichtet. Das vom Quecksilber emittierte UV-Licht reagiert mit dem Leuchtstoff, und dabei entsteht das gewünschte sichtbare Licht, Abb. 30.14.

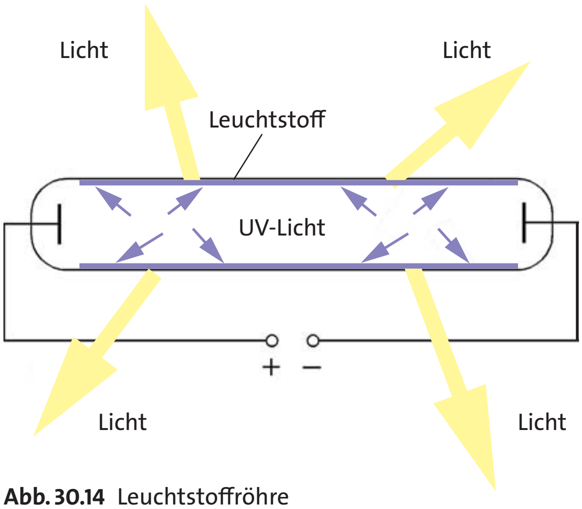


Abb. 30.14 Leuchtstoffröhre

Leuchtstoffröhren brauchen zwar etwas mehr Energie als Natriumlampen, sind aber für die Farbwahrnehmung viel besser.

30.9 Die Spektren von Gasen

Eine mit Wasserstoff gefüllte Leuchtröhre sendet rosafarbenes Licht aus. Wenn man dieses Licht mit einem Spektrometer untersucht, findet man, dass es aus vier Lichtsorten mit den Wellenlängen

$\lambda_1 = 410$ nm (violett),
$\lambda_2 = 434$ nm (violett),
$\lambda_3 = 486$ nm (blau) und
$\lambda_4 = 656$ nm (rot)

besteht. Wie kommt dieses Lichtgemisch zustande?

Die Energie der entsprechenden Photonen beträgt

$E_1 = 0{,}48 \cdot 10^{-18}$ J,
$E_2 = 0{,}46 \cdot 10^{-18}$ J,
$E_3 = 0{,}41 \cdot 10^{-18}$ J und
$E_4 = 0{,}3 \cdot 10^{-18}$ J.

Abb. 30.15 Energieleiter des Wasserstoffatoms

Diese Energiewerte finden sich auf der Energieleiter der Wasserstoffatome wieder: Sie entsprechen den Energiedifferenzen zwischen dem zweiten bis fünften angeregten Zustand und dem ersten, Abb. 30.15.

In der Leuchtröhre werden also Wasserstoffatome nicht nur in den ersten angeregten Zustand befördert, sondern auch in höher angeregte Zustände.

Für den Rückgang aus einem höher angeregten Zustand in den Grundzustand hat das Atom, wie wir schon gesehen hatten, verschiedene Möglichkeiten. Es kann direkt in den Grundzustand zurückspringen, oder es kann die Energieleiter schrittweise hinuntersteigen: z. B. zunächst nur in den ersten angeregten Zustand und dann in den Grundzustand.

Daher können angeregte Atome viele unterschiedliche Photonen emittieren, und daher besteht das Licht, das von einer Leuchtröhre abgestrahlt wird, aus einem Gemisch von Lichtsorten mit unterschiedlichen Wellenlängen.

Abb. 30.16 stellt das Emissionsspektrum von Wasserstoff dar. Es ist allerdings nicht vollständig. Um das gesamte Spektrum des von Wasserstoff emittierten Lichts aufzutragen, müsste man die Wellenlängenskala erweitern, da Wasserstoff auch Licht im UV- und im Infrarotbereich ausstrahlt.

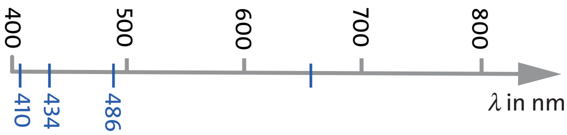


Abb. 30.16 Emissionsspektrum des Wasserstoffs

Das Emissionsspektrum von Natriumdampf für den Wellenlängenbereich von 400 bis 800 nm kennen wir bereits: Natrium emittiert hier nur eine einzige Lichtsorte, Abb. 30.17a.

Dass Quecksilberdampf vorwiegend UV-Licht emittiert, haben wir schon im vorigen Abschnitt erwähnt. Wie man in Abb. 30.17b sieht, emittiert Quecksilber aber auch im sichtbaren Bereich. Man findet Licht der Wellenlängen 405 nm, 408 nm, 436 nm (alle violett), 496 nm (türkis), 546 nm und 578 nm (beide gelb). Dieses Lichtgemisch nehmen wir als blaugrünes Licht wahr.

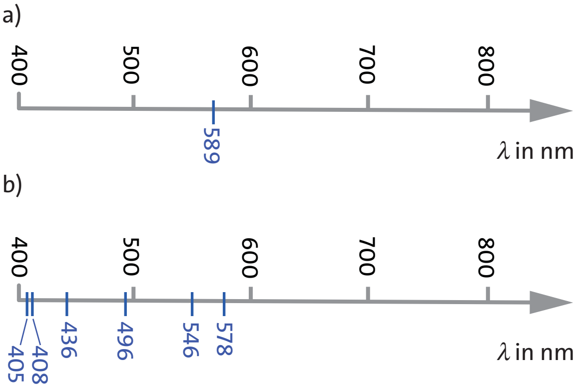


Abb. 30.17 Emissionsspektren von Natrium (a) und Quecksilber (b)

Das Spektrum der zur Werbung eingesetzten rötlich leuchtenden Neonröhren zeigt Abb. 30.18. Andersfarbige Werbeleuchtröhren erhält man durch Verwendung von anderen Gasen oder von Gasgemischen.

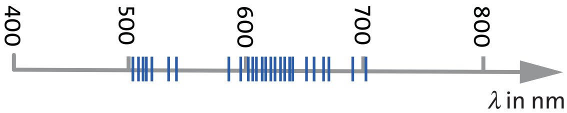


Abb. 30.18 Emissionsspektrum von Neon

Ein Vergleich der Abbildungen 30.16, 30.17 und 30.18 zeigt, dass die Spektren verschiedener Gase leicht voneinander unterschieden werden können. Das Spektrum ist also ein sehr charakteristisches Erkennungsmerkmal, so etwas wie ein „Fingerabdruck“ des Gases.

> Jedes Gas emittiert Licht mit bestimmten, für das Gas typischen Wellenlängen. Die Spektren von Gasen sind deshalb leicht voneinander zu unterscheiden.

Tatsächlich ist die Spektralanalyse eine in der Chemie sehr gebräuchliche Methode, um Stoffe zu identifizieren. Dabei werden die Atome des zu untersuchenden Stoffs oder Stoffgemischs angeregt, und das emittierte Licht wird mit einem Spektrometer untersucht.

Ein etwas anderes Verfahren der Spektralanalyse ist die Untersuchung des Absorptionsspektrums eines Stoffs. Dabei schickt man Licht aus einem breiten Wellenlängenbereich durch das

Gas und schaut mit dem Spektrometer nach, welche Wellenlängen im Spektrum fehlen. Da die Atome die gleichen Photonen absorbieren, die sie auch emittieren, liefert das Absorptionsspektrum die gleichen Daten wie das Emissionsspektrum.

Eine besonders wichtige Rolle spielt die Spektralanalyse in der Astrophysik. Die Sterne sind viel zu weit entfernt, als dass man einfach hinfliegen und Stoffproben entnehmen könnte. Wozu wir dagegen Zugang haben, ist die von den Sternen emittierte elektromagnetische Strahlung. So kann man aus dem Fehlen bestimmter Wellenlängen im sichtbaren Teil des Sonnenlichts auf die stoffliche Zusammensetzung der Gashülle der Sonne schließen: Die Atome in der Hülle absorbieren Photonen des von der Sonne erzeugten weißen Lichts. Es handelt sich also um das Absorptionsspektrum der Sonnenhülle.

Alle Kenntnisse, die wir über die zeitliche Entwicklung und die stoffliche Zusammensetzung von Sternen haben, entstammt der spektroskopischen Untersuchung ihrer Strahlung. Dabei wird natürlich nicht nur der sichtbare Teil der Strahlung untersucht, sondern auch Strahlung aller anderen Wellenlängenbereiche, von den Radiowellen bis zur Gammastrahlung.

30.10 Warum Flammen leuchten

Die Flamme einer Kerze, eines Feuerzeugs, eines Holzfeuers oder eines Bunsenbrenners leuchtet bei gedrosselter Luftzufuhr kräftig gelblich. Wenn man die Luftzufuhr des Bunsenbrenners öffnet, sodass die Flamme rauschend brennt, verschwindet das gelbliche Leuchten. Die Flamme leuchtet dann nur noch schwach bläulich, ähnlich wie die Flammen eines Gasherds. Eine Wasserstoffflamme leuchtet fast gar nicht. Bringt man aber etwas Natrium (auch Kochsalz) oder Lithium in die Wasserstoffflamme, so leuchtet sie kräftig gelb bzw. rot auf. Wie kommt das unterschiedliche Leuchten der verschiedenen Flammen zustande?

Die Atome und Moleküle eines Gases fliegen mit hoher Geschwindigkeit kreuz und quer durch die Gegend und prallen dabei immer wieder gegeneinander. Beim Zusammenstoß der Atome oder Moleküle verformen sich die Atomhüllen. Normalerweise reicht die Energie nicht aus, um eine Anregung zu verursachen. Beim Erhitzen der Gase werden die Atome schneller, ihre Energie nimmt zu. Bei einer hinreichend hohen Temperatur können schließlich Anregungen stattfinden.

Bei vielen Gasen, z. B. bei Wasserstoff und den sonstigen in einer Wasserstoffflamme enthaltenen Gasen wie Sauerstoff und Stickstoff, braucht man allerdings relativ viel Energie, um die Atome bzw. Moleküle so anzuregen, dass sie sichtbare Photonen emittieren. Die hierfür nötige Temperatur wird in der Flamme nicht erreicht; deshalb leuchtet eine Wasserstoffflamme nicht.

Die Energie der Atome und Moleküle in der Flamme reicht aber aus, um etwa die Atome von Lithium oder von Natrium in den ersten angeregten Zustand zu bringen. Wenn man also etwas Lithium in eine Wasserstoffflamme bringt, so werden dessen Atome in den ersten angeregten Zustand gebracht und emittieren beim Rückgang in den Grundzustand „rote“ Photonen, die Flamme leuchtet. Entsprechend leuchtet die Flamme gelb, wenn man etwas Kochsalz, und damit Natrium, in die Flamme bringt. Durch Untersuchen des emittierten Lichts mit einem Spektrometer kann man feststellen, welcher Stoff in der Flamme leuchtet.

> Atome können durch den Zusammenstoß mit anderen Atomen oder Molekülen, z. B. in einer Flamme, angeregt werden.

Das schwache bläuliche Licht, das eine Bunsenbrennerflamme bei genügender Sauerstoffzufuhr aussendet, stammt von CO_2-Molekülen, die aus angeregten Zuständen in den Grundzustand hinuntergehen. Die CO_2-Moleküle werden hier aber nicht durch Zusammenstöße mit anderen Atomen oder Molekülen angeregt. In der Bunsenbrennerflamme verbrennen Kohlenwasserstoffe (überwiegend Methan, CH_4) zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Die Gesamtreaktion

$$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

läuft in mehreren Schritten ab. Einer dieser Schritte ist die Verbrennung von Kohlenstoffmonoxid:

$$CO + O \to CO_2^*.$$

Bei dieser Reaktion entsteht Kohlenstoffdioxid im angeregten Zustand. Beim Rückgang in den Grundzustand emittieren die CO_2^*-Moleküle Photonen:

$$CO_2^* \to CO_2 + \gamma\,.$$

Diese Photonen bilden das bläuliche Licht der Flammen von Bunsenbrennern und Gasherden.

> Bei chemischen Reaktionen können angeregte Atome und Moleküle entstehen.

Nach demselben Prinzip erzeugen Glühwürmchen das Licht, das sie aussenden. Ein Glühwürmchen glüht nicht, wie ein Stück heißes Eisen glüht; vielmehr laufen im Hinterleib eines Glühwürmchens chemische Reaktionen ab, bei denen angeregte Moleküle entstehen, die dann sichtbare Photonen emittieren.

Wenn man die Luftzufuhr eines Bunsenbrenners drosselt, steht nicht genug Sauerstoff für die vollständige Oxidation zur Verfügung. Es bleiben Kohlenstoffatome übrig, die sich zu Kohlenstoffkörnchen zusammenschließen. Diese Körnchen sind die Bestandteile des Rußes. Wegen der hohen Temperaturen in der Flamme glühen die Rußkörnchen, d. h., sie senden Licht aus.

Das relativ kräftige gelbliche Leuchten der Flamme eines gedrosselten Bunsenbrenners, einer Kerze oder eines Feuerzeugs kommt also nicht von den beteiligten Gasen, sondern von glühenden Rußteilchen. Deshalb ähnelt das Spektrum dieser Flammen dem einer Glühbirne: Das ausgesandte Licht setzt sich aus Licht aller Wellenlängen von 400 bis 800 nm zusammen. Wie das Glühen zustande kommt, werden wir im nächsten Kapitel untersuchen.

31 FESTE STOFFE

Bevor wir uns mit den festen Stoffen beschäftigen, tragen wir zusammen, worin die wesentlichen Unterschiede in der Anordnung der Atome in Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen bestehen und welche Gemeinsamkeiten es gibt.

31.1 Die Anordnung der Atome in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen

Die Atome oder Moleküle eines Gases fliegen kreuz und quer in der Gegend herum. Dabei prallen sie zwar immer wieder gegeneinander, die meiste Zeit sind sie aber weit voneinander entfernt.

Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen dagegen sind die Atome nicht voneinander getrennt, sondern liegen direkt nebeneinander, ähnlich wie Tennisbälle in einem Korb.

Es gibt zwei Möglichkeiten, Tennisbälle dicht zusammenzupacken. Sie können entweder regelmäßig aufgeschichtet werden, Abb. 31.1, oder sie können ungeordnet nebeneinander gelegt werden, Abb. 31.2. Dasselbe gilt für die Atome in Flüssigkeiten und Feststoffen.

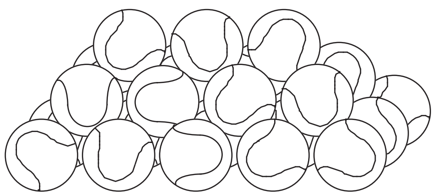


Abb. 31.1 Tennisbälle können regelmäßig aufgeschichtet werden ...

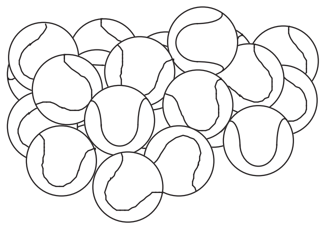


Abb. 31.2 ... oder durcheinander liegen.

In Feststoffen sind die Atome meistens regelmäßig angeordnet. Abb. 31.3 zeigt ein Beispiel für einen Feststoff, der aus zwei Atomsorten besteht. Man nennt solche Stoffe kristalline Feststoffe oder Kristalle. Metalle, die meisten Gesteinsarten, Salze, Zucker, Schwefel und Diamant sind kristallir

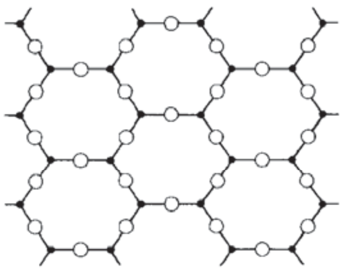


Abb. 31.3 Kristalliner Feststoff. Die weißen und schwarzen Scheibchen markieren die Lage der Atome der beiden Sorten, aus denen der Kristall besteht.

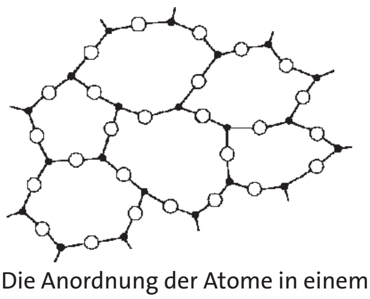


Abb. 31.4 Die Anordnung der Atome in einem amorphen Feststoff

Es gibt aber auch viele Feststoffe, bei denen die Anordnung der Atome mehr Ähnlichkeit mit der der Tennisbälle in Abb. 31.2 hat, z. B. Glas und die meisten Kunststoffe, Abb. 31.4. Die Struktur solcher Stoffe nennt man amorph.

Bei Flüssigkeiten ist die amorphe Struktur die Regel. Fast alle Flüssigkeiten sind amorph, auch die weitaus häufigste Flüssigkeit, nämlich das Wasser. Kristalline Flüssigkeiten verwendet man in Flüssigkristallanzeigen von Taschenrechnern und manchen Flachbildschirmen. Du kennst vielleicht die Abkürzung LCD für den englischen Namen flüssig crystal display.

Tab. 31.1 gibt einen Überblick über die Unterschiede und Gemeinsamkeiten bei der Anordnung der Atome oder Moleküle in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen.

	Abstand der Atome oder Moleküle	Anordnung der Atome oder Moleküle
Gase	groß	fliegen ungeordnet durcheinander
Flüssigkeiten	dicht gepackt	meist amorph, selten kristallin
feste Stoffe	dicht gepackt	kristallin oder amorph

Tab. 31.1

31.2 Die Verteilung des Elektroniums in festen Stoffen

Abb. 31.5 zeigt, wie man sich das Innere eines Feststoffs, in diesem Fall eines Kristalls, vorstellen kann. Je dunkler der Grauton in der Abbildung, desto höher ist die Dichte des Elektroniums. An den Stellen maximaler Dichte befinden sich die Atomkerne. Mit zunehmendem Abstand von einem Kern nimmt die Dichte des Elektroniums zunächst ab — bis man in die Nähe des nächsten Kerns kommt. Dann nimmt sie wieder zu.

Wie bei einzelnen Atomen, befindet sich der größte Teil des Elektroniums in der Nähe der Kerne. Es gibt aber keine Hohlräume zwischen den einzelnen Atomen wie bei der Pyramide aus Tennisbällen in Abb. 31.1. Der ganze Raum zwischen den Kernen ist mit Elektronium ausgefüllt.

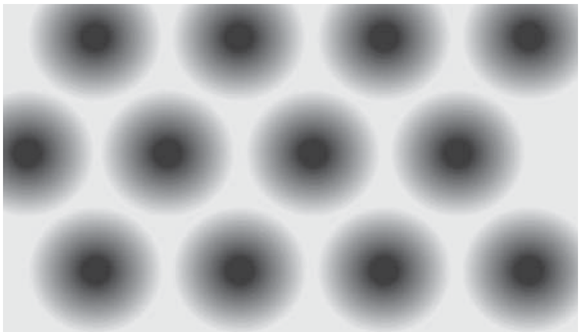


Abb. 31.5 Die Verteilung des Elektroniums in einem Feststoff

Auch existiert keine eindeutige Grenze zwischen dem Ende des einen Atoms und dem Anfang des nächsten. Das Elektronium der einzelnen Atome ist zu einem durchgehenden Stoff verschmolzen.

Auch Abb. 31.6 zeigt die Verteilung des Elektroniums in einem Feststoff, und zwar in einem Kochsalzkristall, NaCl. Die Dichte des Elektroniums ist hier durch Linien gleicher Dichte dargestellt. Je größer die Zahl in der Abbildung, desto höher ist die Dichte des Elektroniums am Ort der Linie. Man kann diese Linien mit den Höhenlinien auf einer Landkarte vergleichen. Je größer die Zahl, die an einer Höhenlinie steht, desto höher liegen die entsprechenden Stellen in der Landschaft.

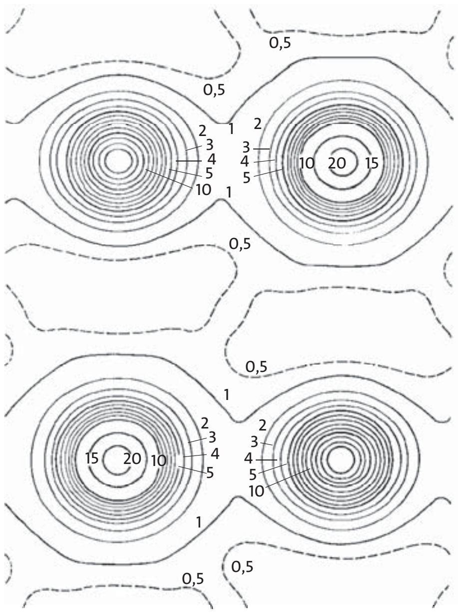


Abb. 31.6 Die Verteilung des Elektroniums in Kochsalz

In Abb. 31.6 erkennt man vier Bereiche, in denen die Dichte des Elektroniums besonders hoch ist: links oben und rechts unten in der Umgebung der Natriumkerne, sowie rechts oben und links unten in der Umgebung der Chlorkerne. Dazwischen liegen Bereiche, in denen die Dichte des Elektroniums recht gering, aber doch von Null verschieden ist.

> In fester Materie bildet das Elektronium einen durchgehend verteilten Stoff, der den gesamten Raum zwischen den Kernen ausfüllt.

Die Atome in einem Gas können fast frei in der Gegend herumfliegen. Sie bewegen sich umso schneller, je höher die Temperatur des Gases ist.

Die Atome von Feststoffen dagegen sind an einen festen Ort gebunden. Sie können ihren Platz im Kristallgitter nicht verlassen. Trotzdem sind sie nicht unbeweglich: Sie führen Schwingungen um eine mittlere Position aus, und auch diese Schwingungsbewegung ist umso schneller, je höher die Temperatur ist.

Aufgabe

1. Wie viele Atome enthält ein Kochsalzkristall mit einer Kantenlänge von einem Millimeter?

31.3 Die Energieleiter von Feststoffen

Wir hatten gesehen, dass das Elektronium in der Hülle eines Atoms verformt werden kann, und dass es in bestimmte Formen einrasten kann. Dasselbe trifft auch für das Elektronium in Feststoffen zu.

Verformen bedeutet hier, genauso wie beim Einzelatom, dass etwas Elektronium von einer Stelle zu einer anderen verschoben wird. Es ändert sich also die Verteilung des Elektroniums: An einer Stelle nimmt die Dichte des Elektroniums ab, an einer anderen entsprechend zu.

Abb. 31.7 zeigt das Elektronium im unverformten Zustand. Der Übersichtlichkeit halber haben wir es hier mit konstanter Dichte dargestellt. In Abb. 31.8 siehst du, wie man sich eine Verformung vorstellen kann: An einer Stelle hat die Dichte abgenommen (heller Bereich), an einer anderen hat sie zugenommen (dunkler Bereich). Es entsteht also eine Verdünnung und eine Verdichtung.

Abb. 31.7 Das Elektronium im unverformten …

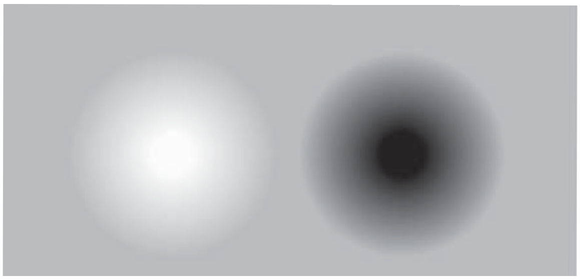


Abb. 31.8 … und in einem verformten Zustand (schematisch)

Das Elektronium in einem Feststoff kann in sehr viele verschiedene Formen gebracht werden, und die Verformungen sind nicht auf den Bereich eines einzelnen Atoms beschränkt, sie können sich über viele Atome erstrecken.

> Das Elektronium in Feststoffen kann verformt werden. Manche Verformungen behält das Elektronium für einige Zeit bei.

Wie bei den Atomen nennen wir den Zustand mit unverformtem Elektronium den Grundzustand. Die Zustände mit verformtem Elektronium heißen angeregte Zustände.

Da man für das Anregen, je nach Ausprägung der Verformung, unterschiedlich viel Energie braucht, hat ein Feststoff, genauso wie ein Atom, eine Energieleiter. Es gibt aber einen grundlegenden Unterschied zwischen den Energieleitern von Einzelatomen und Feststoffen: Während die Sprossen der Energieleiter eines Atoms sehr schmal sind, weil ein Atom nur ganz bestimmte Energiemengen speichern kann, sind die Sprossen der Energieleiter eines Feststoffs breit. Die Energien, die von Feststoffen gespeichert werden können, umfassen ganze Wertebereiche auf der Energieskala.

Die Energieleitern der Feststoffe lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Beim ersten Typ folgen angeregte Zustände unmittelbar auf den Grundzustand, Abb. 31.9a. Alle Metalle haben Energieleitern dieser Art. Zur Anregung des Elektroniums in Metallen reichen deshalb sehr kleine Energien.

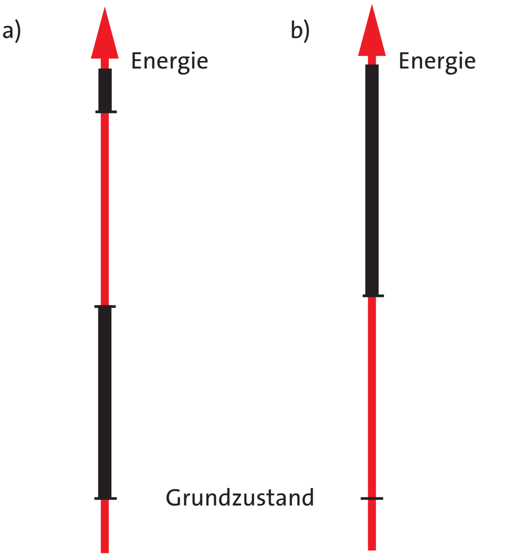


Abb. 31.9 Die Energieleitern von Metallen (a) und Nichtmetallen (b)

Der zweite Energieleitertyp hat zwischen Grundzustand und erster Sprosse eine Energielücke, Abb. 31.9b. Eine solche Energieleiter ist typisch für Nichtmetalle. Hier sind Anregungen nur möglich, wenn die Anregungsenergie ausreicht, um die Lücke zwischen Grundzustand und erster Sprosse zu überwinden.

31.4 Wenn Licht auf Metalle trifft

Wenn Licht auf eine sehr glatte Metalloberfläche trifft, wird es zum größten Teil reflektiert. So besteht etwa die reflektierende Schicht eines Spiegels aus Aluminium. Es wird aber nicht das ganze Licht reflektiert. Man sieht das gut, wenn man das in Abb. 31.10 dargestellte Experiment macht.

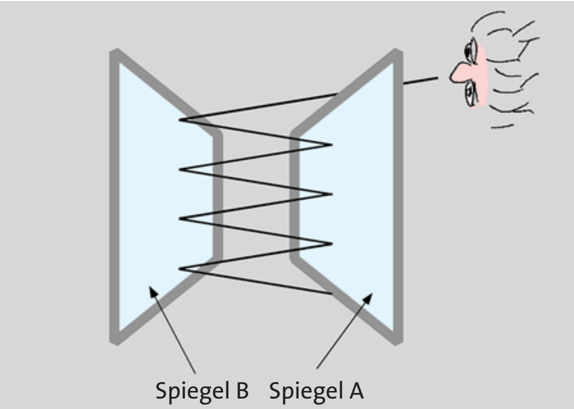


Abb. 31.10 Der Beobachter empfängt Licht, das zwischen den Spiegeln sehr oft hin- und herreflektiert wurde.

Zwei große Spiegel stehen sich in kleinem Abstand gegenüber. Schaut man am Rand des Spiegels A vorbei in Spiegel B hinein, so sieht man das Bild von Spiegel A. In diesem sieht man das Bild von Spiegel B, darin wieder das von A usw. Insgesamt sieht man eine Art Gang, dessen Wände von Spiegelrändern gebildet werden. Licht, das aus diesem Gang von weit hinten zu kommen scheint, ist solches Licht, das zwischen den beiden Spiegeln sehr oft hin- und herreflektiert worden ist. Es ist nun für uns besonders interessant, dass es in diesem Gang nach hinten zu immer dunkler wird, denn das bedeutet, dass bei jeder Reflexion etwas Licht verloren geht. Tatsächlich wird bei jeder Reflexion etwa 10 % des Lichts absorbiert.

Wir schließen daraus, dass der Spiegel, so wie auch jedes andere Metall, Licht nicht nur reflektiert, sondern auch absorbiert. Dass das Licht nicht stärker absorbiert wird, liegt nur daran, dass wegen der Reflexion sehr wenig Licht in das Metall eindringt.

Die Absorption des Lichts in Metallen ist in Übereinstimmung mit seiner Energieleiter, Abb. 31.11. Die drei Balken neben der Energieleiter entsprechen der Energie der Photonen von rotem, grünem und blauem Licht. Alle drei Balken reichen über den erlaubten Energiebereich, d h. die erste Sprosse der Energieleiter, nicht hinaus. Das bedeutet, dass die Photonen des sichtba-

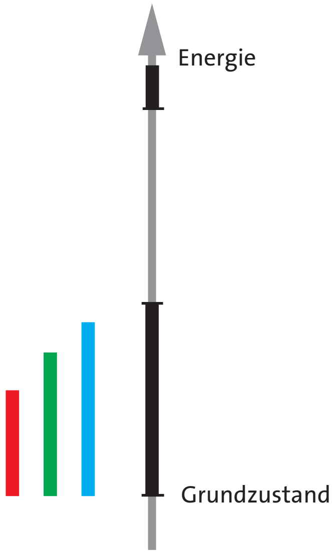


Abb. 31.11 Die Energien der sichtbaren Photonen reichen nicht über die erste Sprosse der Energieleiter eines Metalls hinaus.

ren Lichts das Elektronium in Metallen anregen können.

> Photonen des sichtbaren Lichts können das Elektronium von Metallen anregen. Dabei werden sie absorbiert.

Es ist nun gar nicht schwer, ein Metall dazu zu bringen, dass es nicht nur 10 %, sondern alles auftreffende Licht absorbiert. Es genügt, das Metall in feine Teilchen zu zerlegen. Jedes Metallpulver absorbiert Licht fast vollständig: Metallpulver sind schwarz. Wie ist das zu erklären?

Wenn Licht auf ein Metallpulver trifft, wird es nicht nur einmal reflektiert, sondern sehr oft — von einem Pulverkörnchen zum nächsten, Abb. 31.12. Nach der ersten Reflexion sind noch 90 % der ursprünglichen Lichtmenge übrig, nach der zweiten noch 81 %, nach der dritten 73 % usw. Nach 25 Reflexionen sind noch 7 % übrig und nach 50 Reflexionen nur noch 0,5 %, also fast nichts mehr. Je feiner das Metallpulver, desto größer ist die Zahl der Reflexionen, und desto schwärzer ist das Pulver. Das Licht läuft sich in dem Pulver tot.

Dass pulverförmige Metalle Licht absorbieren, zeigt eine Erfahrung, die jeder schon einmal ge-

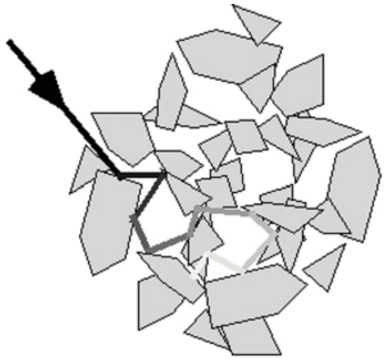


Abb. 31.12 Licht wird in einem Metallpulver mehrfach hin- und herreflektiert.

macht hat: Wenn man mit einem weißen Metallputzmittel eine saubere, glänzende Aluminiumoberfläche abreibt, wird das Putzmittel schwarz. Der Grund für das Schwarzwerden ist das abgeriebene Aluminiumpulver.

Wie Licht bei zahlreichen Reflexionen nach und nach ganz verschwinden kann, sieht man auch in einem anderen, sehr einfachen Experiment. In einen Karton, etwa einen Schuhkarton, wird ein kleines Loch geschnitten, Abb. 31.13.

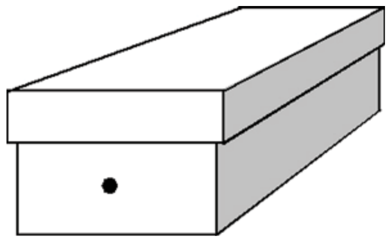


Abb. 31.13 Das Loch in dem Schuhkarton ist schwarz.

Die Innenseiten des Kartons sollen weiß sein, sodass sie nur wenig Licht absorbieren. Man sieht aber, dass das Loch trotzdem völlig schwarz ist. Durch das Loch gelangt Licht in den Karton hinein. Es findet aber nicht wieder aus dem Karton heraus. Da bei jedem Auftreffen auf die Kartonwand etwas Licht absorbiert wird, ist nach einigem Hin und Her im Karton nichts mehr übrig.

Alles Schwarz, das wir in unserer Umgebung wahrnehmen, kommt auf diese Art zustande, z. B. auch das Schwarz von gedruckten Buchstaben. Bei genauer Betrachtung des Papiers sieht man, dass es eine raue Oberfläche hat. Das auftreffende Licht legt im Papier einen Zickzackkurs zurück, bevor es wieder herauskommt und z. B. in deine Augen gelangt. Befindet sich an der betreffenden Stelle auf dem Papier ein Stoff, der bei jeder Reflexion einen Teil des Lichts absorbiert, so erscheint das Papier dort schwarz.

> In schwarzen Gegenständen läuft sich das Licht tot.

31.5 Wenn Licht auf Nichtmetalle trifft

Abb. 31.14 zeigt eine Energieleiter, wie sie viele Nichtmetalle haben. Den Balken entsprechen die Photonen des sichtbaren Lichts. Keiner der drei Balken reicht an die erste Sprosse der Energieleiter heran. Die Photonen des sichtbaren Lichts können das Elektronium dieser Stoffe also nicht verformen. Sie werden nicht absorbiert, sondern gehen durch das Material hindurch. Stoffe mit einer solchen Energieleiter sind also durchsichtig. Beispiele für solche Stoffe sind Glas, Salze, Zucker, Eis, Zellulose (der Hauptbestandteil von Papier), die meisten Mineralien (z. B. Quarz und Feldspäte), Diamant und Kunststoffe.

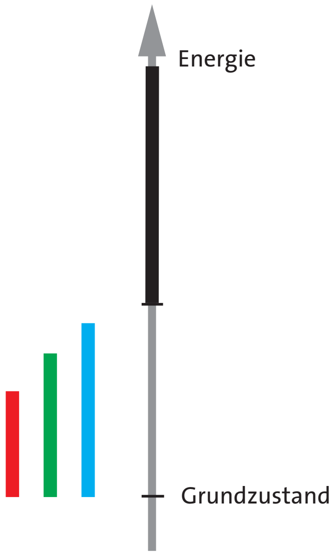


Abb. 31.14 Die Energien der Photonen des sichtbaren Lichts reichen nicht an die erste Sprosse der Energieleiter eines Nichtmetalls heran.

Vielleicht fallen dir aber Gegenstände ein, die zwar aus einem der genannten Stoffe bestehen, die aber nicht durchsichtig sind, sondern weiß, etwa Feinsalz, Puderzucker, Papier, zerriebenes Glas und Schnee. Alle diese Stoffe oder Dinge bestehen aus kleinen Teilchen: Körnchen oder Fasern. Je kleiner die Teilchen sind, desto kräftiger ist das Weiß. Puderzucker ist weißer als Feinzucker.

Was hier weiß ist, sind aber gar nicht die einzelnen kleinen Teilchen. Bei Schneekristallen, Salzkörnchen, Zuckerkörnchen und Glassplittern kann man es mit bloßem Auge erkennen, Papier muss man mit dem Mikroskop betrachten: Die einzelnen Körnchen oder Fasern sind durchsichtig. Der Farbeindruck Weiß ergibt sich erst bei einer Ansammlung von vielen transparenten Teilchen.

> Weiße Gegenstände bestehen aus vielen kleinen, durchsichtigen Teilchen.

Licht, das von einer Seite auf einen solchen Gegenstand trifft, wird von den durchsichtigen Teilchen nicht absorbiert, sondern gebrochen: die Richtung des Lichts wird verändert. Nach mehrmaligem Brechen kommt das Licht auf derselben Seite wieder heraus, auf der es eingetreten ist. Es geht also durch den Stoff nicht hindurch — der Stoff ist undurchsichtig.

Auch das Weiß der Wolken kommt so zustande. Auch eine Wolke besteht aus vielen kleinen durchsichtigen Teilchen, nämlich Wassertröpfchen.

Es sind aber durchaus nicht alle Nichtmetalle durchsichtig oder weiß. So gibt es farbiges Glas und Papier, farbige Steine und farbige Kunststoffe. Die Farbigkeit hat in diesen Fällen ihre Ursache darin, dass den durchsichtigen Nichtmetallen andere Stoffe beigemischt sind, die sichtbares Licht mit bestimmten Wellenlängen absorbieren.

Es gibt aber noch eine andere Ursache dafür, dass ein Nichtmetall farbig ist, oder sogar auch schwarz: Bei der in Abb. 31.15 dargestellten Energieleiter ist die Energielücke, also der Abstand zwischen dem Grundzustand und der ersten Sprosse der Energieleiter, kleiner als die Energie der Photonen des blauen Lichts.

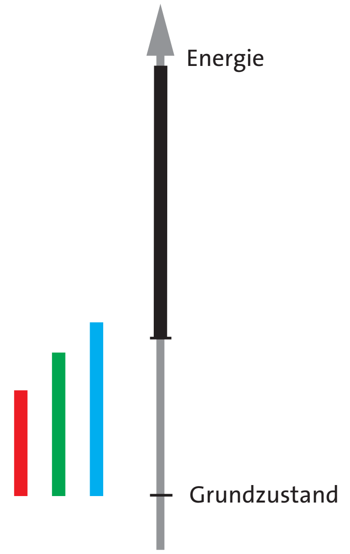


Abb. 31.15 Die Energieleiter von Cadmiumsulfid, daneben die Energie der Photonen von rotem, grünem und blauem Licht

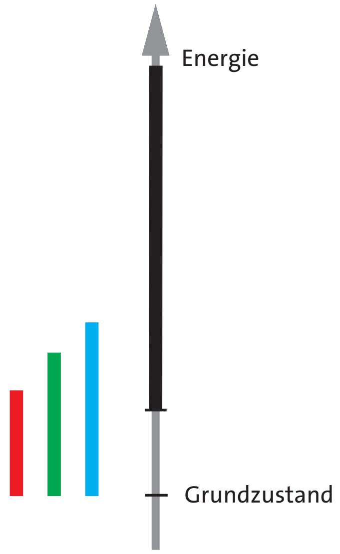


Abb. 31.16 Energieleiter eines Halbleiters

Ein Beispiel für einen Stoff mit einer solchen Energieleiter ist Cadmiumsulfid. Der längste der drei Balken (er entspricht den Photonen des blauen Lichts) ragt in den Bereich der erlaubten Energien hinein. Die Energie dieser Photonen reicht also aus, um die Energielücke zu überspringen und das Elektronium anzuregen. Die Photonen des blauen Lichts werden dabei absorbiert.

Alle anderen Photonen werden nicht absorbiert. Im durchgelassenen Licht fehlt das blaue Licht, das Gemisch aus dem Rest ergibt Gelb. Ein Stück Cadmiumsulfid ist deshalb durchsichtig und gelb.

Bei Silizium, Germanium und Graphit ist die Lücke zwischen Grundzustand und erster Sprosse noch kleiner als bei Cadmiumsulfid, Abb. 31.16. Die Energien aller Photonen des sichtbaren Lichts reichen zum Überspringen der Energielücke, mit der Konsequenz, dass sichtbares Licht nicht durchgelassen wird.

Der Teil, der nicht reflektiert wird, wird absorbiert. Da ein größerer Teil des Lichts im Material versickert als bei Metallen, sind glatte Oberflächen nicht spiegelnd, sondern zeigen einen schwarzen Glanz. Man nennt diese Stoffe Halbleiter.

Auch die Halbleiter sind als Pulver tiefschwarz, da sich das Licht bei den Reflexionen an den Körnchen des Pulvers totläuft. Ruß ist ein solcher Stoff. Er besteht hauptsächlich aus winzigen Graphitteilchen. Er wird unter anderem zur Herstellung von Druckerschwärze und zum Schwärzen von Kunststoffen verwendet.

Da die Energien von Infrarot-Photonen nicht bis zur ersten Sprosse ihrer Energieleitern hinaufreichen, sind Halbleiter für Infrarot-Licht durchlässig – im Gegensatz zu Metallen.

Man verwendet Silizium zur Herstellung von Linsen für Infrarot-Kameras. Infrarot-Licht wird durch diese Linsen durchgelassen, und es wird gebrochen. Sichtbares Licht dagegen, das den Film auch belichten würde und deshalb nicht in die Infrarot-Kamera gelangen darf, wird nicht durchgelassen.

31.6 Feststoffe als Lichtquellen

Das Licht einer Glühlampe kommt von einem glühenden Wolframdraht, das Licht einer Kerzenflamme von glühenden Rußteilchen. Wie entsteht dieses Licht?

In einem Feststoff bewegen sich die Kerne und das sie umgebende Elektronium um eine mittlere Lage, und zwar umso heftiger, je höher die Temperatur ist. Je schneller die Bewegung ist, desto mehr Energie haben die Atome.

In einem Metall reicht schon bei normaler Temperatur die Energie dieser Bewegung aus, um das Elektronium anzuregen. Mit den Anregungen nimmt das Elektronium aber nur wenig Energie auf. Auch die Photonen, die beim Rückgang in den Grundzustand emittiert werden, haben daher geringe Energien. Es sind Infrarot-Photonen und keine Photonen des sichtbaren Lichts, Abb. 31.17.

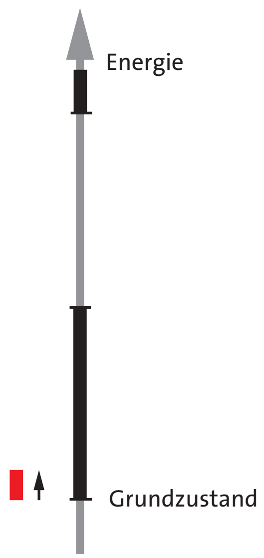


Abb. 31.17 Bei Normaltemperatur reicht die Energie der Bewegung der Atome in Metallen nur für leichte Verformungen aus.

Wenn man das Metall erhitzt, wird die Bewegung der Atome heftiger, ihre Energie nimmt zu. Das Elektronium wird stärker verformt, und beim Rückgang in den Grundzustand entstehen energiereichere Photonen, Abb. 31.18. Bei noch höherer Temperatur entstehen schließlich Photonen des sichtbaren Lichts – das Metall glüht.

Auch alle schwarzen Nichtmetalle, d.h. Halbleiter, beginnen zu glühen, wenn man sie erhitzt.

> Metalle und Halbleiter können glühen, d.h. bei hoher Temperatur sichtbares Licht erzeugen.

Anders ist es bei durchsichtigen und farblosen Nichtmetallen. Ihre Energielücke ist so groß, dass das Elektronium auch bei hohen Temperaturen

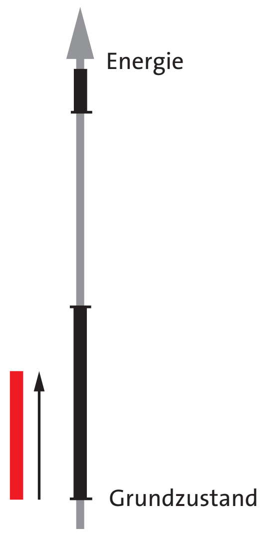


Abb. 31.18 Bei höherer Temperatur wird das Elektronium stärker angeregt. Beim Rückgang in den Grundzustand entstehen Photonen des sichtbaren Lichts.

nicht angeregt wird, sodass keine Photonen des sichtbaren Lichts erzeugt werden können.

> Gegenstände aus durchsichtigen Nichtmetallen glühen nicht.

31.7 Wie Feststoffe die Elektrizität leiten

Als Leitungen für Elektrizität benutzt man Kabel, die aus Metalldrähten – meist Kupfer – und einer Umhüllung aus Kunststoff bestehen. Metalldraht verwendet man, weil Metalle die Elektrizität gut leiten, und Kunststoffhüllen, weil Kunststoffe (und allgemein die meisten Nichtmetalle) die Elektrizität nicht leiten und so verhindern, dass die Elektrizität aus der Leitung heraus in die Umgebung fließt.

Elektrizität sitzt immer auf Teilchen, nämlich den negativ geladenen Elektronen und den positiv geladenen Protonen der Atomkerne. Wenn Elektrizität durch einen Kupferdraht hindurchfließen soll, müssten sich entweder die Kerne oder das Elektronium mitbewegen. Nun sind die Kerne fest an ihren Platz im Kristallgitter gebunden, sie können sich nicht durch den Kupferdraht hindurchbewegen. Also bleibt nur das Elektronium.

Man könnte sich vorstellen, dass ein elektrischer Strom dadurch zustande kommt, dass das Elektronium eines Feststoffs als Ganzes an den Kernen vorbei durch den Feststoff fließt. Nun hängt aber das Elektronium so fest an den Kernen, dass es sich auf diese Art nicht verschieben lässt.

Die Situation ist ähnlich wie bei dem folgenden Problem: Ein großer, schwerer Teppich soll verschoben werden, Abb. 32.10. Wir fassen den Teppich an einem Ende an und versuchen, ihn über den Boden zu ziehen. Da er groß und schwer ist, rührt er sich aber nicht. Wir suchen eine andere Möglichkeit.

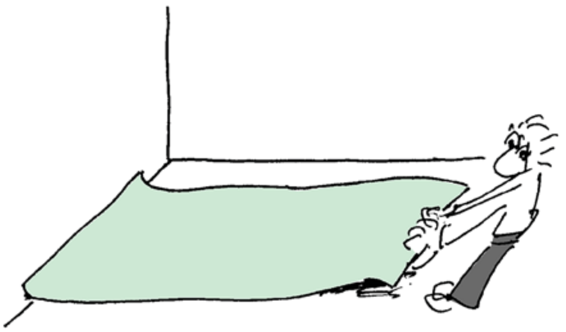


Abb. 31.19 Eine Möglichkeit, einen Teppich zu verschieben

Wir drücken an einer Seite eine Falte in den Teppich hinein, Abb. 31.20. Diese Falte lässt sich nun sehr leicht durch den Teppich hindurchschieben, und am Ende ist der ganze Teppich ein Stück verschoben.

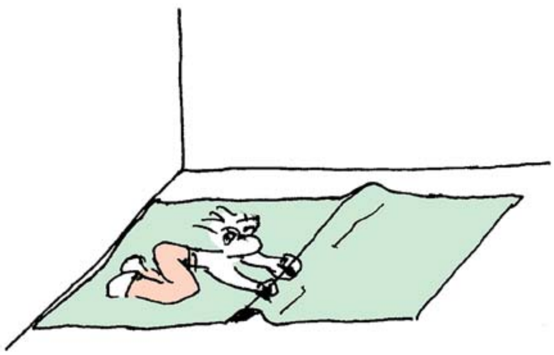


Abb. 31.20 ... und eine zweite Möglichkeit

Ähnlich wie der Teppich verhält sich das Elektronium in einem Feststoff. Das Elektronium als Ganzes lässt sich zwar nicht bewegen. Kleine Verformungen dagegen kann man leicht durch den Feststoff hindurchschieben. Ein Feststoff ist daher elektrisch leitfähig, wenn sich sein Elektronium leicht verformen lässt.

Wenn man für eine elektrische Spannung zwischen zwei Seiten eines Festkörpers sorgt, etwa indem man die eine Seite mit dem Pluspol einer Batterie verbindet und die andere Seite mit dem Minuspol, so wandern die Verdichtungen in Richtung Pluspol und die Verdünnungen in Richtung Minuspol, Abb. 31.21. Wie die Verschiebung der Falte im Teppich eine Verschiebung des Teppichs zur Folge hat, so hat die Verschiebung der Verdichtungen und Verdünnungen im Elektronium einen Netto-Transport von Elektronium zur Folge.

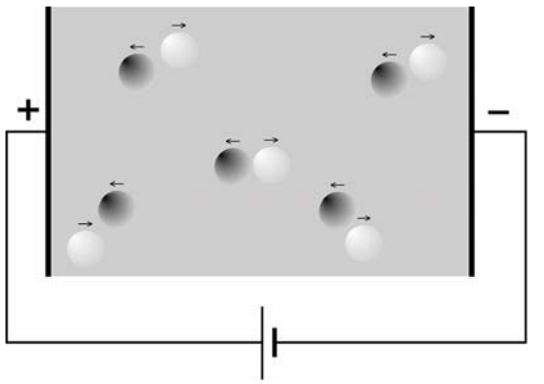


Abb. 31.21 Bei angeschlossener Batterie wandern die Verdünnungen in Richtung Minuspol und die Verdichtungen in Richtung Pluspol.

Mit den Verdichtungen wandert Elektronium in Richtung Pluspol. Aber auch die Verschiebung der Verdünnungen in Richtung Minuspol hat zur Folge, dass Elektronium in Richtung Pluspol wandert. Es ist wie bei einer Luftblase, die vom Boden eines Wasserglases nach oben steigt. Wo sich vor dem Aufsteigen der Luftblase Luft befand, nämlich unten, befindet sich nach dem Aufsteigen Wasser. Also ist Wasser von oben nach unten gelangt, Abb. 31.22.

> Der Transport von Elektrizität durch Feststoffe kommt zustande durch die Bewegung von Verformungen des Elektroniums.

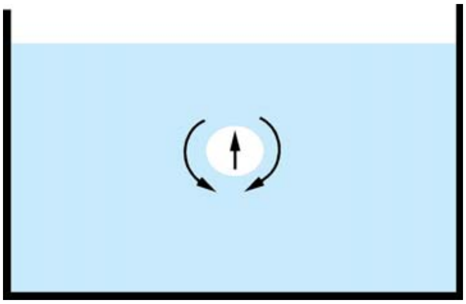


Abb. 31.22 Das Aufsteigen der Luftblase ist mit dem Absinken von Wasser verbunden.

Du weißt, dass sich das Elektronium in Metallen leicht verformen lässt, während man relativ viel Energie braucht, um das Elektronium in Nichtmetallen anzuregen. In Metallen reicht die Energie, die eine angeschlossene Batterie dem Elektronium zur Verfügung stellt, zur Anregung. Es gibt also Verformungen, die durch das Metall wandern können, und mit den Verformungen wird Elektrizität transportiert: Metalle sind gute elektrische Leiter.

In Nichtmetallen schafft es die Batterie nicht, das Elektronium anzuregen. Es gibt keine Verformungen, und es kann keine Elektrizität transportiert werden: Nichtmetalle leiten die Elektrizität nicht.

31.8 Wie man Nichtmetalle leitfähig machen kann

Wir betrachten ein Nichtmetall, dessen Energielücke nicht zu groß ist, z. B. Cadmiumsulfid. Photonen von blauem Licht haben genug Energie, um die Lücke zu überwinden. Wenn man ein solches Nichtmetall mit weißem Licht beleuchtet, d. h. mit Licht, das auch Photonen des blauen Lichts enthält, so wird das Elektronium angeregt, es werden Verformungen erzeugt. Ist der Cadmiumsulfidkristall Teil eines Stromkreises, so kann ein elektrischer Strom fließen. Der Kristall ist durch die Anregung leitfähig geworden. Sobald die Beleuchtung aufhört, werden keine Verformungen im Elektronium mehr erzeugt, und die Leitfähigkeit verschwindet wieder.

Man nennt Stoffe, die bei Beleuchtung leitfähig werden, Photoleiter. Je mehr Licht auf einen Photoleiter trifft, desto geringer ist sein Widerstand. Man verwendet Photoleiter zur Messung der Lichtintensität, zum Beispiel in Photoapparaten.

Bei Halbleitern genügt schon das Erwärmen, um das Elektronium anzuregen und die Leitfähigkeit zu verbessern. Du verstehst jetzt den Namen Halbleiter.

> Nichtmetalle mit schmaler Energielücke können durch Beleuchten oder durch Erhitzen leitfähig gemacht werden.

Es gibt noch eine weitere Möglichkeit, die Leitfähigkeit von Nichtmetallen zu erhöhen. Man ersetzt einen kleinen Teil der Atome des Materials durch Atome eines anderen Stoffs. Man wählt diese „Fremdatome“ so, dass sie entweder ein Elektron mehr oder ein Elektron weniger in der Hülle haben, als die Atome des Feststoffs, in den sie eingebaut werden.

So baut man etwa Arsenatome in Germanium ein. Das zusätzliche Elektron jedes Arsenatoms verhält sich wie eine Verdichtung des Elektroniums. Wenn man zwischen zwei Seiten des Germaniumkristalls eine elektrische Spannung anlegt, wandern diese Verdichtungen in Richtung Pluspol, es fließt ein elektrischer Strom.

Baut man in das Kristallgitter Atome ein, die ein Elektron weniger in der Hülle haben als die Germaniumatome, z. B. Galliumatome, so erzeugt man Verdünnungen. Diese wandern bei angeschlossener Batterie in Richtung Minuspol.

> Nichtmetalle können durch Einbauen von Fremdatomen leitfähig gemacht werden.

Die wichtigsten elektronischen Bauelemente — Dioden und Transistoren — werden aus solchem leitfähig gemachten Germanium oder Silizium hergestellt. Wir werden uns mit ihnen in den nächsten beiden Abschnitten beschäftigen.

31.9 Die Diode

Eine Diode ist ein elektronisches Bauelement mit zwei Anschlüssen. In einen Stromkreis eingebaut lässt sie die Elektrizität nur in einer Richtung durch. Eine Diode ist also für die Elektrizität, was ein Fahrradventil für die Luft ist.

Eine Diode besteht aus einem Halbleiter, meist Germanium oder Silizium. In einem Teil des Materials erzeugt man durch Einbau von Fremdatomen Verdichtungen, im anderen Teil Verdünnungen, Abb. 31.23. Die beiden Teile sind mit den elektrischen Anschlüssen der Diode verbunden.

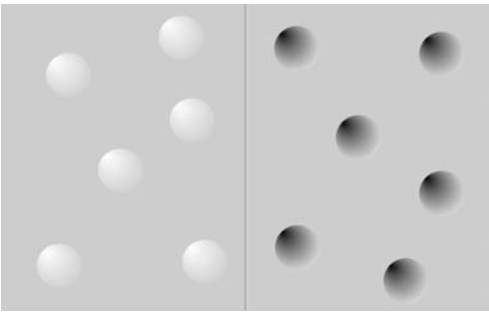


Abb. 31.23 Im linken Teil der Diode befinden sich Verdünnungen, im rechten Teil Verdichtungen.

Wir schließen eine Diode zunächst so an eine Batterie an, dass der Pluspol der Batterie mit der Seite der Verdünnungen und der Minuspol mit der Seite der Verdichtungen verbunden ist. Die Verdünnungen wandern in Richtung Minuspol, also zur Mitte der Diode, die Verdichtungen in Richtung Pluspol, also auch zur Mitte, Abb. 31.24. Gleichzeitig werden vom linken Kabel Verdünnungen und vom rechten Verdichtungen nachgeliefert, denn auch in den Metalldrähten der Kabel wandern die Verdünnungen in Richtung Minuspol und die Verdichtungen in Richtung Pluspol.

In der Mitte der Diode treffen Verdichtungen und Verdünnungen aufeinander, und die Verdichtungen „fallen" in die Verdünnungen hinein. Verdichtungen und Verdünnungen vernichten sich gegenseitig, und zwar im selben Maß, wie sie von den Anschlüssen der Diode nachgeliefert werden. Bei angeschlossener Batterie fließt also durch die Diode ein elektrischer Strom.

Wir schließen die Diode nun umgekehrt an die Batterie an, verbinden also den Minuspol mit der Seite der Verdünnungen und den Pluspol mit der Seite der Verdichtungen. Die Verdünnungen wandern wieder in Richtung Minuspol, diesmal also von der Mitte der Diode weg nach links, die Verdichtungen wandern in Richtung Pluspol,

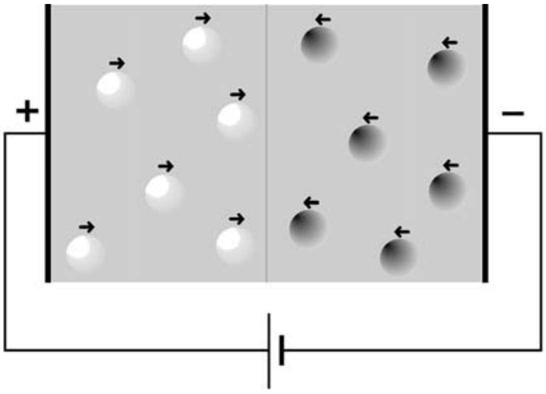


Abb. 31.24 Verdichtungen und Verdünnungen wandern zur Mitte der Diode.

also von der Mitte weg nach rechts, Abb. 31.25. Da von der Mitte der Diode her keine Verdichtungen und Verdünnungen nachgeliefert werden, kommt der Vorgang schnell zum Stillstand. Trotz angeschlossener Batterie fließt kein elektrischer Strom durch die Diode.

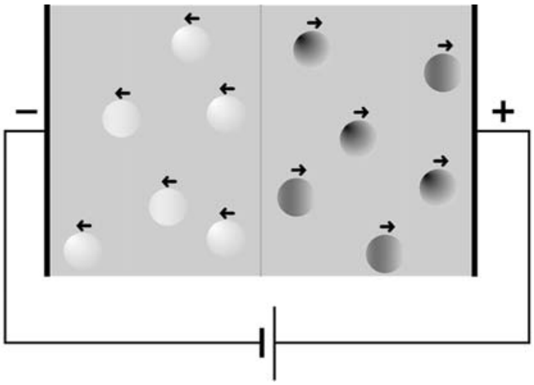


Abb. 31.25 Verdichtungen und Verdünnungen wandern von der Mitte weg nach außen.

Die Diode ist also in eine Richtung für die Elektrizität durchlässig, in die andere nicht. Baut man eine Diode in einen Stromkreis ein, der von einer Wechselspannungsquelle versorgt wird, Abb. 31.26, so fließt kein Wechselstrom. Die Diode lässt den elektrischen Strom nur in eine Richtung fließen. Der Strom wird gleichgerichtet. Die Diode arbeitet als Gleichrichterdiode.

Dioden haben aber noch andere interessante Eigenschaften. Wenn eine Diode an eine Batterie angeschlossen ist wie in Abb. 31.25, wandern die Verdichtungen und Verdünnungen zur Mitte und

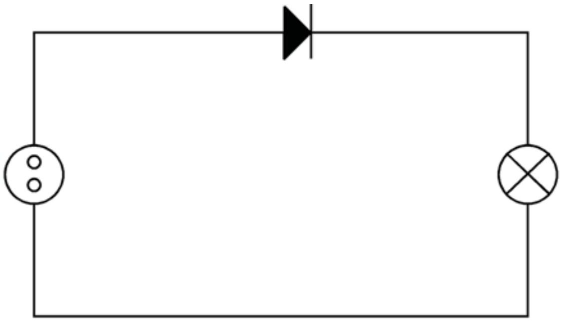


Abb. 31.26 Die Gleichrichterdiode lässt den elektrischen Strom nur in eine Richtung fließen.

vernichten sich dort gegenseitig. Dabei muss die in den Verdichtungen und Verdünnungen gespeicherte Energie abgegeben werden. Das geschieht durch die Erzeugung von Photonen, Abb. 31.27. Eine Diode, die sichtbares Licht erzeugt, nennt man eine Leuchtdiode oder LED (light emitting diode).

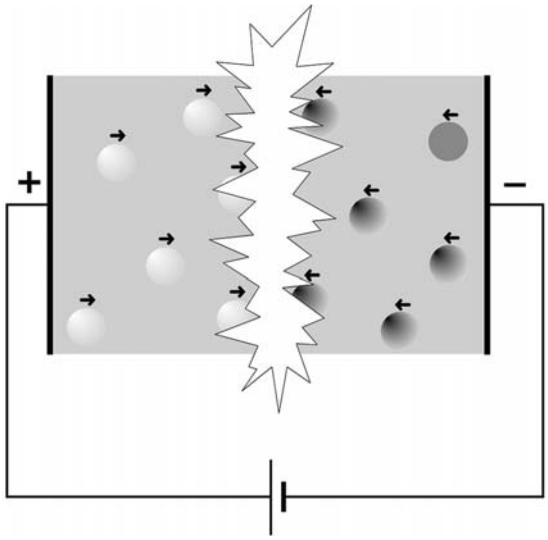


Abb. 31.27 Wenn die Verdichtungen in die Verdünnungen fallen, entstehen Photonen – die Diode leuchtet.

Schließt man eine Diode so an eine Batterie an wie in Abb. 31.25, so sperrt sie. Der elektrische Strom kann nicht fließen. Es gibt aber eine Möglichkeit, auch diese Diode durchlässig zu machen.

Bei der Absorption von Photonen in einem Feststoff werden Verdichtungen und Verdünnungen erzeugt. Wenn man nun die Diode beleuchtet, werden die Verdünnungen und Verdichtungen, die die Batterie abzieht, nachgeliefert. Sie wandern wieder nach links bzw. rechts, d. h., es fließt ein elektrischer Strom durch die Diode, Abb. 31.28. Die Stärke des elektrischen Stroms hängt von der Beleuchtung ab. Bei viel Licht ist der Strom stark, bei wenig ist er schwach. Wird die Diode gar nicht beleuchtet, so fließt auch kein Strom. Man nennt eine solche Diode Photodiode. Photodioden werden, ähnlich wie Photoleiter, zum Nachweis und zur Messung von Licht eingesetzt.

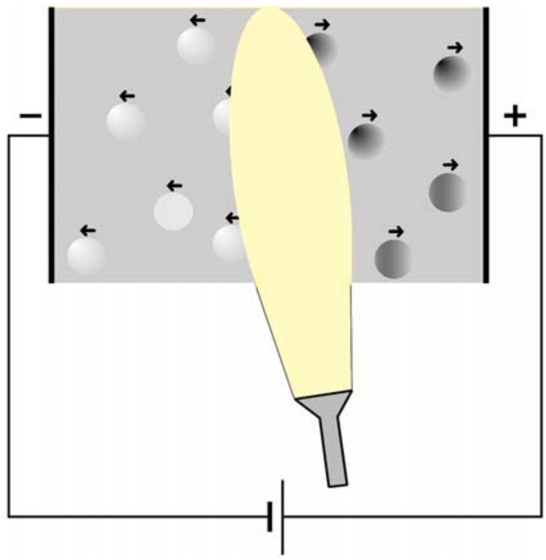


Abb. 31.28 Bei Beleuchtung werden in der Diode Verdichtungen und Verdünnungen erzeugt.

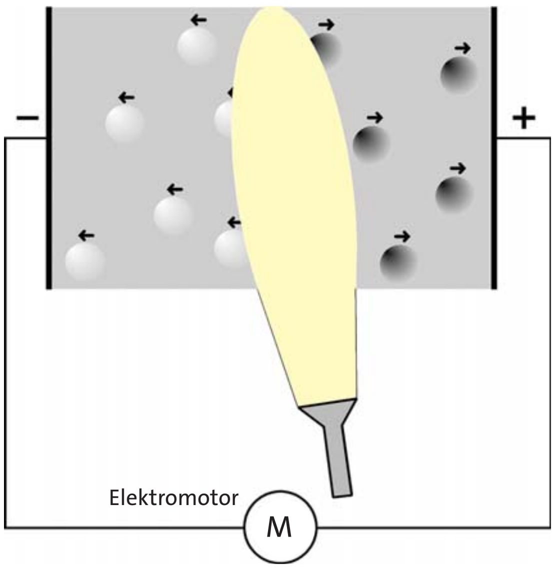


Abb. 31.29 Die Diode arbeitet als Elektrizitätspumpe.

31 FESTE SOFFE

Schließlich kann man eine Diode noch als Elektrizitätspumpe verwenden.

Wir schließen eine Photodiode statt an eine Batterie an einen kleinen Elektromotor an, Abb. 31.29. Beleuchtet man die Diode, so werden zusätzliche Verdichtungen und Verdünnungen erzeugt. Dadurch werden die bereits vorhandenen Verdünnungen nach links und die Verdichtungen nach rechts aus der Diode heraus- und durch den Elektromotor gedrückt. Die Diode pumpt also Elektrizität durch den Stromkreis.

Eine Diode, die für diese Funktion optimiert ist, heißt Photozelle oder Solarzelle.

Dioden verwendet man
- als Ventile für den elektrischen Strom (Gleichrichterdioden);
- als Lichtquellen (Leuchtdioden);
- als Nachweisgerät für Licht (Photodioden);
- als Elektrizitätspumpen (Photozellen).

Aufgabe

1. Stelle für den Stromkreis von Abb. 31.26 die elektrische Stromstärke als Funktion der Zeit graphisch dar.

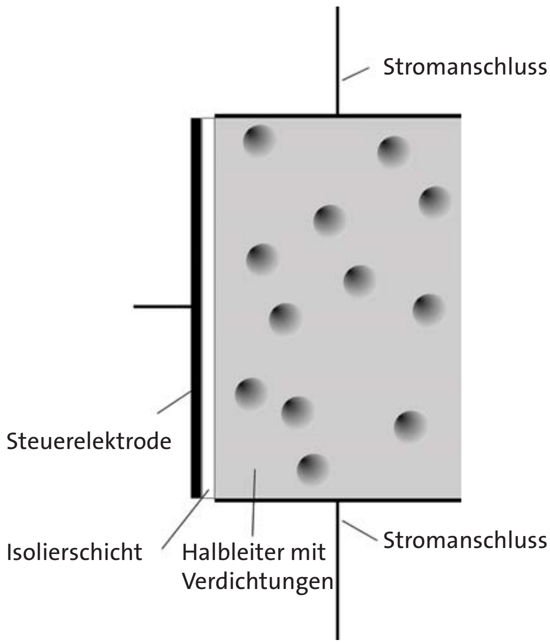


Abb. 31.30 Aufbau eines Transistors

31.10 Der Transistor

Ein Transistor ist ein Schalter für den elektrischen Strom, der elektrisch gesteuert, d. h. geöffnet oder geschlossen werden kann. Er erfüllt also im Wesentlichen dieselbe Aufgabe wie ein Relais. Gegenüber dem Relais hat er aber einige Vorteile: Erstens braucht man zum Steuern einen viel kleineren elektrischen Strom, zweitens reagiert er viel schneller, drittens ist er sehr viel kleiner und viertens kann man diesen Schalter nicht nur öffnen und schließen, sondern seine „Durchlässigkeit“ für den elektrischen Strom auch auf Zwischenwerte einstellen.

Eingesetzt werden Transistoren in allen elektronischen Geräten. Im Smartphone, im Fernseher und im Computer befinden sich Millionen von Transistoren.

Abb. 31.30 zeigt den Aufbau eines Transistors. Der zu steuernde Strom wird durch einen Halbleiter geschickt, der Fremdatome, und damit Verdichtungen des Elektroniums enthält.

Seitlich am Halbleiter befindet sich eine dünne isolierende Schicht und über dieser noch eine Metallschicht, die Steuerelektrode. Halbleiter, Isolierschicht und Steuerelektrode bilden zusammen einen Kondensator. Diesen Kondensator kann man laden, indem man zwischen Steuerelektrode und Halbleiter eine Spannung legt: Den einen Pol der Spannungsquelle verbindet man mit der Steuerelektrode, den anderen mit einem der beiden Anschlüsse des Halbleiters.

Lädt man einen Kondensator, so nimmt die Menge des Elektroniums auf der einen Platte zu und auf der anderen ab.

Schließt man die Spannungsquelle so an wie auf Abb. 31.31, so werden aus dem Halbleiter Verdichtungen von Elektronium abgezogen. Der Halbleiter enthält aber nur so wenige Verdichtungen, dass der Verlust durch das Aufladen des Kondensators die Leitfähigkeit sehr stark beeinträchtigt: Schon durch Anlegen einer kleinen Spannung verliert der Halbleiter praktisch alle Verdichtungen. Er wird dadurch zum Nichtleiter. Durch den Halbleiter kann kein elektrischer Strom mehr hindurchfließen, er verhält sich wie ein geöffneter Schalter.

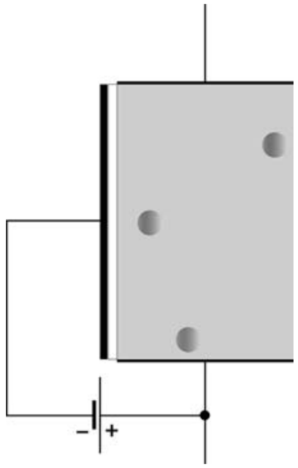


Abb. 31.31 Die Batterie zieht Verdichtungen aus dem Halbleiter heraus.

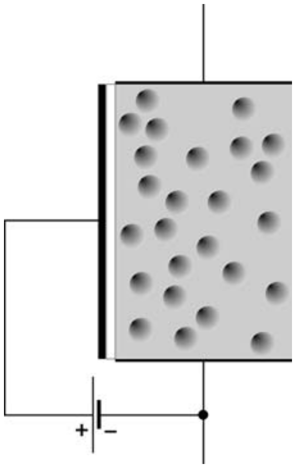


Abb. 31.32 Die Batterie drückt Verdichtungen in den Halbleiter hinein.

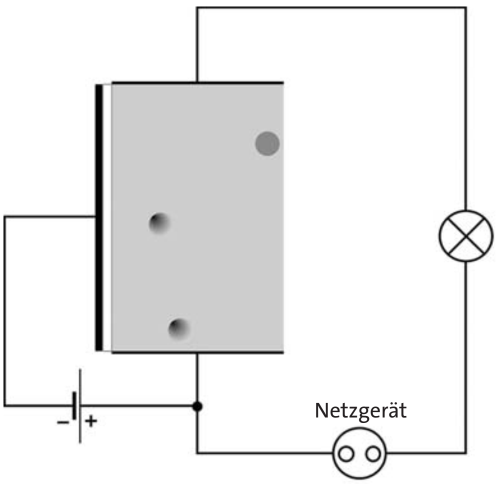


Abb. 31.33 Der Stromkreis der Lampe ist unterbrochen.

Verbindet man dagegen den Minuspol der Spannungsquelle mit dem Halbleiter und den Pluspol mit der Steuerelektrode, Abb. 31.32, so bekommt der Halbleiter zusätzliche Verdichtungen. Er leitet den elektrischen Strom sehr gut, verhält sich also wie ein geschlossener Schalter.

Abb. 31.33 zeigt einen vollständigen Stromkreis mit einem Transistor. Ist das elektrische Potenzial der Steuerelektrode niedriger als das des Halbleiters, so leitet der Halbleiter nicht, und die Lampe leuchtet nicht, Abb. 31.33.

Ist das elektrische Potenzial der Steuerelektrode höher, so leitet der Halbleiter, und die Lampe leuchtet, Abb. 31.34.

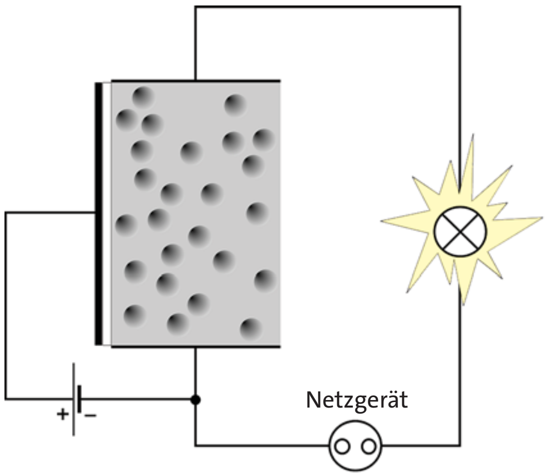


Abb. 31.34 Der Stromkreis der Lampe ist geschlossen.

Aufgabe

1. Es gibt Transistoren, deren Halbleitermaterial mit Verdünnungen leitfähig gemacht wurde. Wie muss man eine Batterie an den Transistor anschließen, damit sich der Transistor wie ein geöffneter Schalter verhält?

32 ATOMKERNE

Bei unserer Beschäftigung mit den Atomen haben wir uns vor allem für das Elektronium der Atomhülle interessiert. Der Atomkern war nur dazu da, das Elektronium zusammen zu halten. Nun laufen in der Natur aber Vorgänge ab, die man nur verstehen kann, wenn man den Atomkern genauer kennt: Prozesse, bei denen sich die Atomkerne verändern. Man nennt diese Vorgänge Kernreaktionen.

Kernreaktionen laufen in geringem Maße hier auf der Erde ab. Sehr viel wichtiger sind aber die Kernreaktionen, die in der Sonne stattfinden. Sie sind dafür verantwortlich, dass die Sonne Licht emittiert und so die Erde mit Energie versorgt. Kernreaktionen werden aber auch technisch angewendet, zum Nutzen und zum Schaden der Menschen: In Kernreaktoren, in Fusionsreaktoren, in der Atombombe und in der Wasserstoffbombe.

Beim Studium des Kernaufbaus wird dir vieles wiederbegegnen, was du über den Aufbau der Atomhülle kennen gelernt hast. Und du wirst viel von dem anwenden können, was dir im Chemieunterricht bei der Beschreibung von gewöhnlichen chemischen Reaktionen begegnet ist.

32.1 Der Aufbau der Atomkerne

Bei der Diskussion des Aufbaus des Atoms hatten wir schon gelernt:

Der Durchmesser des Atomkerns beträgt etwa 1/100 000 des Atomdurchmessers. Trotz dieser Winzigkeit sitzt im Atomkern praktisch die ganze Masse des Atoms. Die Masse der Hülle beträgt nur etwa 1/4000 der Kernmasse.

Außer in Masse und Größe gibt es aber noch einen anderen bemerkenswerten Unterschied zwischen Hülle und Kern.

Du erinnerst dich, dass die Dichte des Elektroniums von innen nach außen abnimmt, sodass die Atomhülle keinen scharfen Rand hat – ähnlich wie die Lufthülle der Erde. Außerdem hatten wir gesehen, dass sich die Hüllen von schweren und leichten Atomen nicht so sehr in der Größe als vor allem in der Dichte unterscheiden. Ein Gold- und ein Lithiumatom sind etwa gleich groß, die Dichte des Elektroniums ist aber beim Goldatom sehr viel größer als beim Lithiumatom.

Ganz anders verhält es sich mit den Atomkernen. Die Dichte ist im Atomkern durchgehend gleich – also nicht wie bei der Erdatmosphäre, sondern wie zum Beispiel bei einer Glaskugel. Außerdem ist die Dichte des Kernmaterials von einem zum anderen Atomkern gleich. Der Kern des Lithiumatoms hat etwa dieselbe Dichte wie der des Goldatoms. Dafür unterscheiden sich Lithium- und Goldatomkern in der Größe, Abb. 32.1.

> Die Dichte ist in einem Atomkern überall gleich. Die Dichten verschiedener Kerne sind untereinander gleich.

Was die Form betrifft, so sind sich Kern und Hülle wieder sehr ähnlich. Auch die Kerne sind näherungsweise kugelrund. Einige weichen etwas von der Kugelgestalt ab: Manche erscheinen etwas plattgedrückt, wie eine Mandarine, andere etwas verlängert, etwa wie ein Kiwi.

Man misst die Dichte in g/cm^3. Wasser zum Beispiel hat eine Dichte von

$$\rho = 1\ \mathrm{g/cm^3},$$

d. h. 1 cm^3 Wasser wiegt 1 g, oder 1 Liter wiegt 1 kg. Dass fast die ganze Masse eines Atoms im Kern konzentriert ist, hat zur Folge, dass die

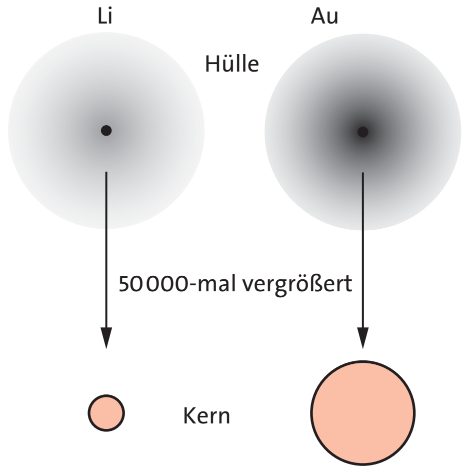


Abb. 32.1 Die Hülle des Goldatoms ist genauso groß wie die des Lithiumatoms, aber sie ist viel dichter. Der Kern des Goldatoms ist genauso dicht wie der des Lithiumatoms, aber er ist viel größer.

Dichte des Kerns riesige Werte annimmt. Die Kernmaterie hat eine Dichte von

$$\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^3.$$

Wenn man 1 cm^3 Kernmaterie zusammenbekäme, so hätte diese Stoffportion eine Masse von

$$10^{14} \text{ g} = 100\,000\,000 \text{ Tonnen.}$$

Um über diesen merkwürdigen Stoff, aus dem die Kerne bestehen, noch mehr zu lernen, machen wir ein Experiment, das wir schon bei der Untersuchung der Hülle gemacht haben: Wir „greifen hinein“, um eine Portion davon herauszuholen. Das Hineingreifen darfst du nicht zu wörtlich nehmen. Mit den Händen können wir weder in die Hülle noch in den Kern hineingreifen. Man kann aber etwas machen, was dem Hineingreifen durchaus entspricht: mit irgendwelchen anderen kleinen Teilchen gegen den Kern schießen, und auf diese Art etwas von der Kernmaterie hinauskatapultieren. Es kommt uns im Augenblick nicht darauf an, wie man das macht.

Greifen wir also in den Kern hinein, holen eine Portion heraus und schauen uns an, was wir in der Hand haben. Es wird dich nicht überraschen, dass wir auch hier, wie schon beim Elektronium der Hülle, immer nur ganz bestimmte Portionen erwischen. Eines ist aber anders: Es gibt zweierlei kleinste Portionen. Manchmal haben wir etwas in der Hand, was elektrisch positiv geladen ist, und manchmal bekommen wir etwas elektrisch Neutrales. Greifen wir stärker zu, so kann es sein, dass unsere Portion das Zweifache der geladenen Elementarportion ist, oder das Zweifache der neutralen Elementarportion oder gerade so viel, wie eine geladene und eine neutrale Portion zusammen. Du kannst dir vorstellen, was alles passieren kann, wenn wir noch stärker zulangen.

Wie man diese Portionen nennt, weißt du auch schon: Eine positive Elementarportion heißt Proton, eine neutrale heißt Neutron. Ein Kern enthält also eine ganze Zahl von positiven und eine im Allgemeinen andere ganze Zahl von neutralen Portionen. In anderen Worten: Ein Kern enthält eine bestimmte Zahl Protonen und eine bestimmte Zahl Neutronen.

Beachte aber, dass die Protonen und die Neutronen im Kern nicht räumlich voneinander abgegrenzt sind. Wenn du dir den Protonenstoff wie einen roten Pudding vorstellst und den Neutronenstoff wie einen weißen, so bestünde der ganze Kernpudding nicht aus roten und weißen Bereichen, sondern er wäre durchgehend rosa.

In Tab. 32.1 sind die elektrische Ladung und die Masse von Proton, Neutron und Elektron aufgeführt. Die Massen von Proton und Neutron sind fast, aber doch nicht ganz gleich. Das Neutron ist etwas schwerer. Wir werden später sehen, dass dieser Unterschied für bestimmte Kernreaktionen wichtig ist. Merke dir, dass beide Teilchen etwa 1800-mal so schwer sind wie das Elektron.

Die elektrische Ladung des Elektrons ist gerade entgegengesetzt gleich der des Protons. Ein Atom enthält in seiner Hülle genauso viele Elektronen wie es im Kern Protonen enthält. Das hat zur Folge, dass das Atom insgesamt keine elektrische Ladung trägt, es ist elektrisch neutral.

	Elektr. Ladung	Masse
Proton	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C	$1672{,}5 \cdot 10^{-30}$ kg
Neutron	0 C	$1674{,}8 \cdot 10^{-30}$ kg
Elektron	$-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C	$0{,}91 \cdot 10^{-30}$ kg

Tab. 32.1

Die Kernmaterie lässt sich zerlegen in
- Portionen, die positiv geladen sind und
- Portionen, die elektrisch neutral sind.

Eine positive Portion heißt Proton, eine neutrale heißt Neutron.

Aufgaben

1. Die Gesamtzahl von Protonen und Neutronen in einem Kern A sei achtmal so groß wie die in einem Kern B. Um welchen Faktor ist das Volumen von A größer als das von B?
2. Es gibt Himmelskörper, die aus Kernmaterie bestehen, die Neutronensterne. Ein typischer Neutronenstern hat einen Durchmesser von 10 km. Wie groß ist seine Masse?

32.2 Elemente, Nuklide, Isotope

Die Atome der verschiedenen chemischen Elemente unterscheiden sich in der Zahl der Protonen ihrer Kerne. Die Ordnungszahl gibt gerade diese Protonenzahl an. Und solange das Atom nicht ionisiert ist, ist die Ordnungszahl auch gleich der Anzahl der Elektronen.

Ordnungszahl = Anzahl der Protonen im Kern

Wenn wir die Kerne nur nach ihrer Protonenzahl beurteilen, so gibt es so viele verschiedene Kerne, wie es verschiedene chemische Elemente gibt, also etwa 100. Nun kann aber ein Atomkern mit bestimmter Protonenzahl noch mehr oder weniger viele Neutronen enthalten. So gibt es Kaliumatomkerne (also Atomkerne mit 19 Protonen) mit Neutronenzahlen von 20 bis 33. Es gibt also verschiedene Kaliumsorten, oder Isotope, wie man sagt. Chemisch unterscheiden sich die verschiedenen Isotope eines Elements fast gar nicht. Normales, natürliches Kalium ist ein Gemisch aus verschiedenen Isotopen. Auch von allen anderen Elementen existieren verschiedene Isotope.

Die Isotope eines Elements unterscheiden sich in der Anzahl der Neutronen in den Atomkernen.

Wenn man die verschiedenen Sorten jedes chemischen Elements einzeln zählt, kommt man nicht auf etwa 100 verschiedene Grundstoffe, sondern auf etwa 2000. Die 100 verschiedenen Grundstoffe der Chemie nennt man, wie du weißt, Elemente. Die 2000 verschiedenen Grundstoffe, die man erhält, wenn man auch noch nach der Neutronenzahl unterscheidet, heißen Nuklide.

Zur Bezeichnung eines Nuklids benutzt man die folgende Schreibweise:
- das aus der Chemie bekannte Buchstabensymbol des Elements;
- links daneben oben die Gesamtzahl der Protonen und Neutronen und unten die Ordnungszahl, d. h. die Anzahl der Protonen.

Hier einige Beispiele für Nuklide in dieser Schreibweise:

$$\left.\begin{array}{l} {}^{1}_{1}\mathrm{H} \\ {}^{2}_{1}\mathrm{H}\ \text{(Deuterium)} \\ {}^{3}_{1}\mathrm{H}\ \text{(Tritium)} \end{array}\right\}\ \text{drei Wasserstoffisotope}$$

$$\left.\begin{array}{l} {}^{4}_{2}\mathrm{He} \\ {}^{3}_{2}\mathrm{He} \end{array}\right\}\ \text{zwei Heliumisotope}$$

$$\left.\begin{array}{l} {}^{35}_{19}\mathrm{K} \\ {}^{39}_{19}\mathrm{K} \\ {}^{40}_{19}\mathrm{K} \\ {}^{41}_{19}\mathrm{K} \\ {}^{50}_{19}\mathrm{K} \end{array}\right\}\ \text{fünf Kaliumisotope}$$

${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ das häufigste Eisenisotop

${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ das häufigste Uranisotop

${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ ein Isotop des künstlichen Elements Plutonium

Wie du siehst, haben die beiden schweren Isotope des Wasserstoffs sogar eigene Namen bekommen: Das Isotop mit einem Neutron heißt Deuterium und das mit zwei Neutronen heißt Tritium.

Wenn man Kernreaktionen untersucht, interessiert man sich gewöhnlich nur für die Kerne. Es ist deshalb zweckmäßig, ein eigenes Symbol für die Kerne eines Nuklids einzuführen: Man hängt an das Nuklidsymbol noch ein K als Index an.

Während also etwa das Symbol ${}^{12}_{25}\mathrm{Mg}$ die vollständigen Atome eines bestimmten Magnesium-nuklids darstellt, meint man mit dem Symbol ${}^{12}_{25}\mathrm{Mg}_\mathrm{K}$ nur die Kerne dieses Nuklids.

Für manche Zwecke ist eine andere symbolische Darstellung der Nuklide geeigneter. Sie lehnt sich an die Darstellung an, die man in der Chemie benutzt, um Moleküle zu charakterisieren.

Die Formel Al_2O_3 gibt uns den Aluminium- und den Sauerstoffgehalt des Aluminiumoxids an. Entsprechend kann man Nuklide auch dadurch charakterisieren, dass man den Gehalt an Protonen p und an Neutronen n angibt. Hier einige Beispiele für die Übersetzung in diese Schreibweise:

$${}^{1}_{1}\mathrm{H}_\mathrm{K} = \mathrm{p}$$
$${}^{2}_{1}\mathrm{H}_\mathrm{K} = \mathrm{pn}$$
$${}^{3}_{1}\mathrm{H}_\mathrm{K} = \mathrm{pn}_2$$
$${}^{4}_{2}\mathrm{He}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_2\mathrm{n}_2$$
$${}^{3}_{2}\mathrm{He}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_2\mathrm{n}$$
$${}^{35}_{19}\mathrm{K}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{19}\mathrm{n}_{16}$$
$${}^{39}_{19}\mathrm{K}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{19}\mathrm{n}_{20}$$
$${}^{40}_{19}\mathrm{K}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{19}\mathrm{n}_{21}$$
$${}^{41}_{19}\mathrm{K}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{19}\mathrm{n}_{22}$$
$${}^{50}_{19}\mathrm{K}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{19}\mathrm{n}_{31}$$
$${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{26}\mathrm{n}_{30}$$
$${}^{238}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{92}\mathrm{n}_{146}$$
$${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}_\mathrm{K} = \mathrm{p}_{94}\mathrm{n}_{145}$$

Was für Nuklide gibt es aber überhaupt? Wir hatten schon gesagt, dass es insgesamt etwa 2000 sind. Das bedeutet, dass nicht jede beliebige Gehaltsformel einem existierenden Nuklid entspricht. So gibt es zum Beispiel kein pn_3, also Wasserstoff mit 3 Neutronen, oder es gibt nicht das Sauerstoffisotop $\mathrm{p}_8\mathrm{n}_{17}$ oder das Zinkisotop $\mathrm{p}_{30}\mathrm{n}_{50}$.

Die Frage danach, welche Nuklide es gibt, d. h., welche Kombinationen der Kernmaterie p und der Kernmaterie n möglich sind, ist ähnlich wie zum Beispiel die Frage danach, welche chemischen Verbindungen der Stoffe Wasserstoff und Sauerstoff es gibt. Welche der in der folgenden Reihe aufgeführten Wasserstoff-Sauerstoffverbindungen können existieren?

O, H, H_2, O_2, HO, H_2O, HO_2, O_3, H_2O_2, H_3O, H_3O_2, HO_3, …

Einige davon sind alte Bekannte: der molekulare Wasserstoff H_2, der molekulare Sauerstoff O_2, das Wasser H_2O. Von anderen der aufgeführten Stoffe weißt du sicher, dass es sie nicht gibt. Vielleicht kennst du aber auch das Wasserstoffperoxid H_2O_2. Diesen Stoff gibt es zwar, aber er ist nicht stabil. Ebenso das Ozon O_3. Der atomare Wasserstoff H ist noch viel instabiler.

Ähnlich ist es bei den Nukliden. Die meisten denkbaren Kombinationen $\mathrm{p}_x\mathrm{n}_y$ gibt es gar nicht. Und von denen, die existieren können, ist nur ein kleiner Bruchteil stabil.

Abb. 32.2 zeigt die Nuklidkarte, ein Diagramm, mit allen Nukliden, die man kennt. Die Anzahl der Protonen wurde nach rechts, die der Neutronen nach oben aufgetragen. Jeder Kreis entspricht einem der bisher gefundenen oder hergestellten Nuklide. Nur die vollen Kreise stellen aber stabile Nuklide dar. Die den leeren Kreisen entsprechenden sind instabil, sie zerfallen nach und nach von selbst. Für manche ist die Lebensdauer sehr klein, für andere ist sie groß.

> Es gibt etwa 100 verschiedene Elemente und 2000 verschiedene Nuklide.

Aufgaben

1. Wähle aus der Nuklidkarte, Abb. 32.2, sechs Nuklide mit verschiedenen Ordnungszahlen aus und stelle sie symbolisch dar auf die beiden Arten, die im Text beschrieben wurden.
2. Formuliere eine grobe Regel dafür, wie bei den existierenden Nukliden das Verhältnis von Protonen zu Neutronen ist, und zwar zum einen für leichte Elemente (bis zu etwa 20 Protonen) und zum anderen für schwere Elemente. Benutze dazu die Nuklidkarte, Abb. 32.2.
3. Wie viele stabile Nuklide gibt es?
4. Welches ist das schwerste stabile Nuklid?
5. Welches sind die stabilen Isotope des Neons?
6. Welches ist das leichteste Element, das kein stabiles Isotop hat?
7. Welches Element hat die meisten Isotope? Wie viele sind es? Wie viele davon sind stabil?

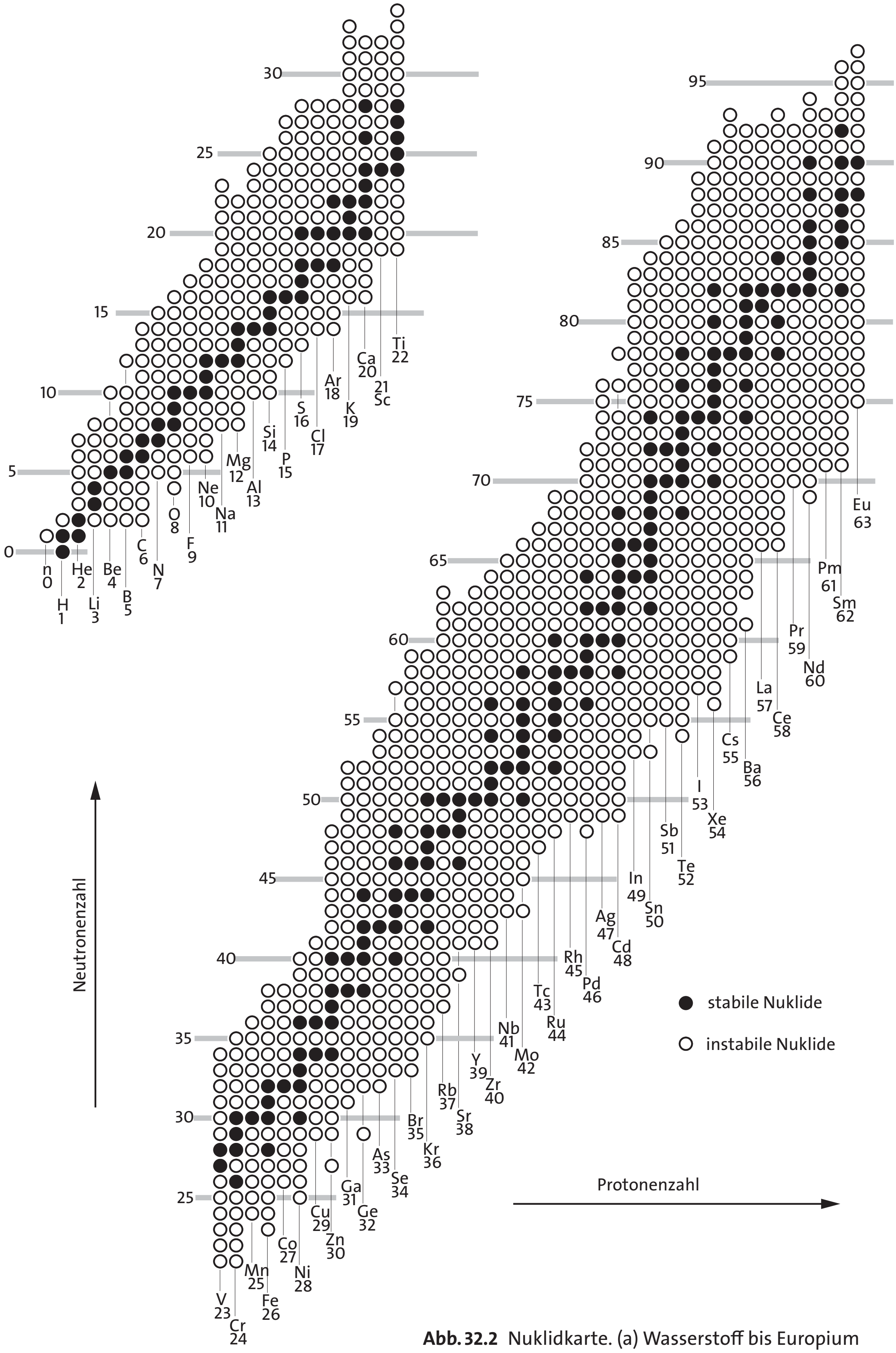


Abb. 32.2 Nuklidkarte. (a) Wasserstoff bis Europium

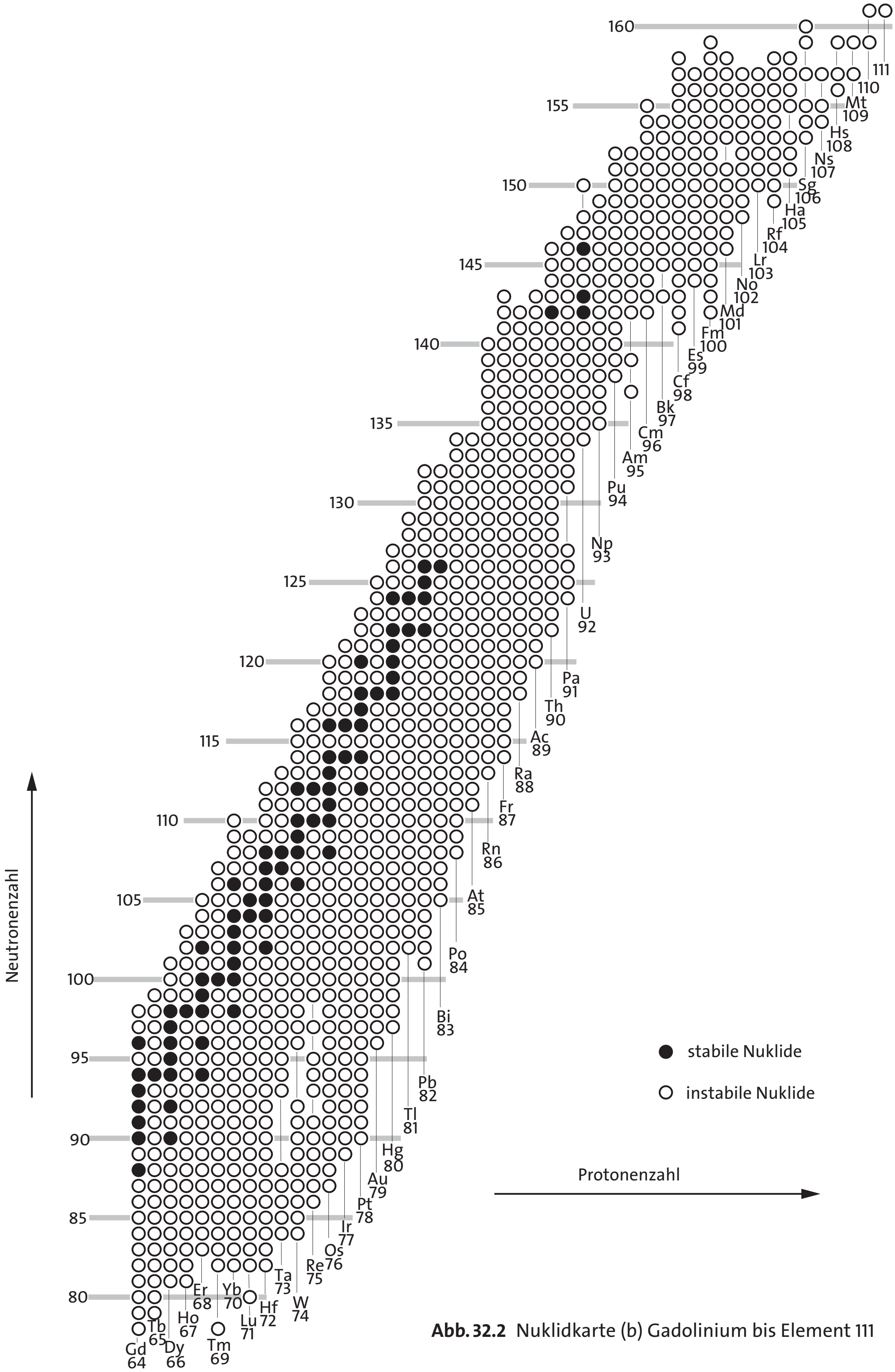


Abb. 32.2 Nuklidkarte (b) Gadolinium bis Element 111

32.3 Die Anregung von Kernen

Wie die Atomhülle, so lässt sich auch der Kern verformen, und wie die Hülle, so rastet auch der Kern in bestimmte Formen ein. Die wichtigsten Unterschiede: Erstens braucht man zum Verformen eines Atomkerns etwa eine Million mal mehr Energie als zum Verformen der Hülle, und zweitens ist die Lebensdauer eines angeregten Zustands des Kerns im Durchschnitt nur ein Millionstel der Lebensdauer eines angeregten Zustands der Hülle, Tab. 32.2.

	typische Anregungsenergie	typische Halbwertszeit
Atomhülle	10^{-19} J	10^{-8} s
Atomkern	10^{-13} J = 0,1 pJ	10^{-14} s

Tab. 32.2

Wir haben es im Folgenden oft mit Energien der Größenordnungen 10^{-12} bis 10^{-15} Joule zu tun. Es ist daher praktisch, die Abkürzung „pico“ für 10^{-12} zu benutzen: 10^{-12} J = 1 pJ. Abb. 32.3 zeigt die Energieleiter eines Thalliumisotops.

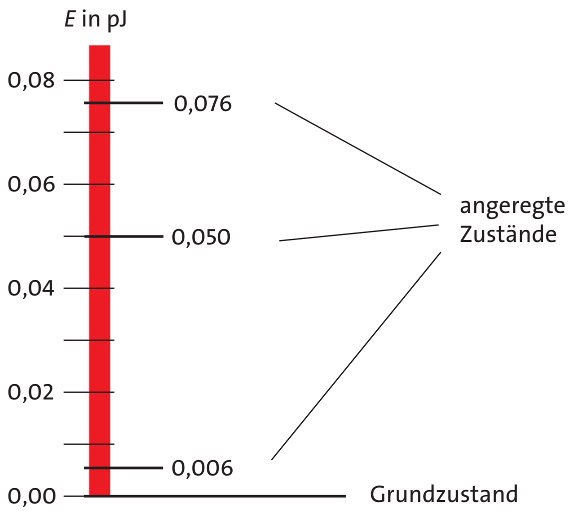


Abb. 32.3 Energieleiter des Thalliumisotops $^{208}_{81}$Tl

Auch die Methoden der Anregung sind im Prinzip dieselben wie bei der Hülle.

So kann man einen Kern mit Photonen anregen. Diese müssen genau die Energie haben, die dem Übergang vom Grundzustand in den angeregten Zustand entspricht. Die Energie darf nicht zu gering sein, sie darf aber auch nicht zu groß sein. Man braucht, wie schon gesagt, viel mehr Energie, als zur Anregung der Hülle. Bei den Photonen muss es sich also um γ-Strahlung handeln.

Ein Beispiel für einen solchen Prozess ist die Anregung eines Thalliumkerns:

$$^{208}_{81}\mathrm{Tl}_K + \gamma \rightarrow {}^{208}_{81}\mathrm{Tl}_K{}^*.$$

Man kann Kerne aber auch mit Teilchen anregen, die eine Ruhmasse haben, wie Elektronen, Protonen oder Neutronen. (Auch dieser Vorgang hat seine Entsprechung bei der Anregung der Hülle.)

In diesem Fall muss das anregende Teilchen genug Energie mitbringen, es darf aber auch mehr Energie haben, als für die Anregung nötig ist. Das wegfliegende Teilchen kann ja die übrige Energie wieder mitnehmen. Als Beispiel betrachten wir wieder den Thalliumkern:

$$^{208}_{81}\mathrm{Tl}_K + p' \rightarrow {}^{208}_{81}\mathrm{Tl}_K{}^* + p.$$

Hier stellt p' ein schnelles Proton dar, p ein langsames.

Auch die dritte Methode, einen angeregten Kern herzustellen, hat ihr Analogon bei der Atomhülle: Bei manchen chemischen Reaktionen entstehen Reaktionsprodukte im angeregten Zustand.

Ein Beispiel ist eine Gasflamme. Genauso liegen die Reaktionsprodukte bei Kernreaktionen oft im angeregten Zustand vor. Wir werden Kernreaktionen später noch sehr ausführlich diskutieren.

Hier sei schon ein erstes Beispiel genannt: Ein bestimmtes Kohlenstoffisotop reagiert mit einem Proton zu einem angeregten Stickstoffisotop:

$$^{13}_{6}\mathrm{C}_K + p \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N}_K{}^*.$$

> Wie die Atomhülle, so lässt sich auch der Atomkern anregen. Im angeregten Zustand hat der Kern eine andere Form als im Grundzustand. Beim Anregen wird eine bestimmte Menge Energie im Kern gespeichert.

Du erinnerst dich, dass es sich bei Masse und Energie um dieselbe physikalische Größe handelt. Misst man die Größe in der Einheit kg, so nennt man sie Masse. Energie nennt man sie, wenn man sie in Joule misst. Man kann aber die eine Maßeinheit leicht in die andere umrechnen. In anderen Worten: Man kann Masse in Energie umrechnen.

Die Umrechnung geschieht nach der Formel

$$E = k \cdot m$$

$k = 9 \cdot 10^{16}$ J/kg ist der konstante Umrechnungsfaktor.

Wenn wir einem System Energie zuführen, wird es schwerer. In vielen Fällen ist aber die Energiezunahme, verglichen mit der Gesamtenergie des Systems, so klein, dass man das Schwererwerden gar nicht nachweisen kann. So ändert sich die Masse eines Atoms beim Anregen der Hülle so wenig, dass man davon fast nichts merkt.

Anders ist es bei der Anregung von Atomkernen. Wir betrachten die Anregung des Thalliumisotops $^{208}_{81}$Tl, dessen Energieleiter Abb. 32.3 zeigt, in den zweiten angeregten Zustand. Hierzu muss man ihm eine Energie von 0,05 pJ zuführen. Wir rechnen um in kg:

$$m = \frac{E}{k} = \frac{0{,}05 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{J}}{9 \cdot 10^{16}\,\mathrm{J/kg}} = 0{,}56 \cdot 10^{-30}\,\mathrm{kg}.$$

Verglichen mit der Gesamtmasse des Thalliumatoms ist dies zwar immer noch wenig. Es ist aber fast schon so viel wie die Masse eines Elektrons ($0{,}9 \cdot 10^{-30}$ kg).

Beim Anregen wird ein Kern schwerer.

Aufgaben

1. Die Masse eines Thalliumatoms beträgt $350 \cdot 10^{-27}$ kg. Um welchen Bruchteil der Gesamtmasse wird das Atom schwerer
a) bei einer typischen Anregung der Atomhülle,
b) bei einer typischen Anregung des Kerns?
2. Kann man die Masse von 1 mol eines Stoffes, dessen Kerne angeregt sind, von der Masse desselben Stoffes mit den Kernen im Grundzustand mithilfe einer Waage unterscheiden?

32.4 Die Trennenergie

Um zwei aneinander hängende Magneten voneinander zu trennen, braucht man Energie. Die getrennten Magneten haben zusammen also mehr Energie als die aneinander hängenden. Da Energie gleich Masse ist, bedeutet das, dass die getrennten Magneten schwerer sind, als die zusammenhängenden, Abb. 32.4. Allerdings ist der Effekt so klein, dass man ihn niemals in einem Experiment wie dem von Abb. 32.4 nachweisen könnte.

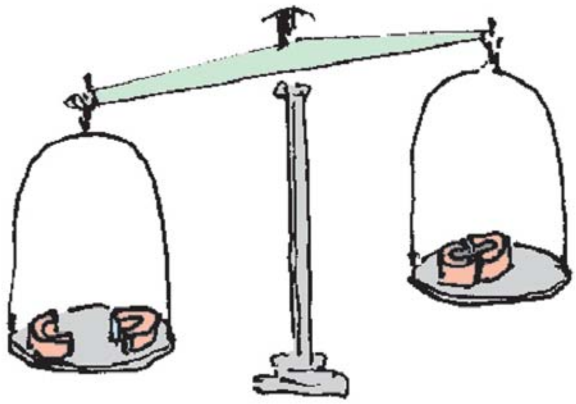


Abb. 32.4 Die getrennten Magneten haben mehr Energie als die zusammenhängenden. Der Effekt ist allerdings so gering, dass man ihn durch eine Wägung nicht nachweisen kann.

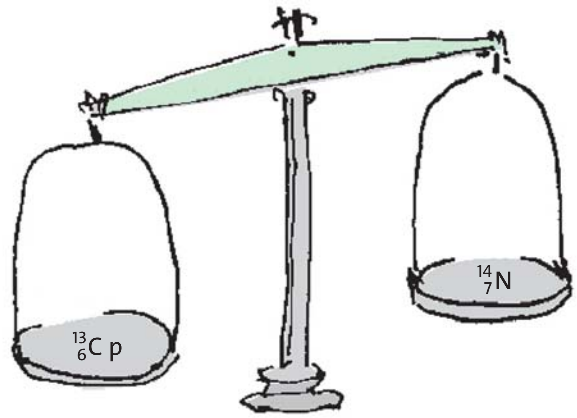


Abb. 32.5 Ein $^{14}_{7}$N-Kern ist leichter als ein $^{13}_{6}$C -Kern und ein Proton zusammen.

Um aus einem Kern ein Proton herauszuholen, braucht man Energie. Kern und Proton zusam-

32 ATOMKERNE

men haben daher weniger Energie als Kern und Proton getrennt. Holt man aus einem $^{14}_{7}$N-Kern ein Proton heraus, so entsteht ein $^{13}_{6}$C -Kern. Der $^{14}_{7}$N-Kern ist leichter als der $^{13}_{6}$C -Kern und das Proton zusammen, Abb. 32.5. Hier ist der Effekt wesentlich größer als im Beispiel mit den Magneten, und er ist durchaus nachweisbar.

Dasselbe gilt natürlich für einen Kern, aus dem man ein Neutron herausholt. Auch beim Abtrennen eines Neutrons wird das System schwerer, denn man braucht für den Vorgang Energie.

Wir wollen nun in Gedanken einen Atomkern nach und nach in einzelne Protonen und Neutronen zerlegen. Für diese vollständige Zerlegung eines Nuklidkerns braucht man eine ganz bestimmte Energiemenge, die Trennenergie. Sie hat für jedes Nuklid einen anderen Wert. Wir brauchen diese Energiewerte später, um zu entscheiden, in welche Richtung eine Kernreaktion läuft. Die Tabelle im Anhang Abschnitt 33.2 enthält die Trennenergien von etwa 1000 Nukliden.

> Zum Zerlegen eines Kerns in Protonen und Neutronen braucht man Energie, die Trennenergie. Die Bestandteile sind daher zusammen schwerer als der Kern.

Aufgaben

1. Die Trennenergie ist näherungsweise proportional zur Gesamtzahl von Protonen und Neutronen. Wähle 5 Nuklide der Tab. 33.2 im Anhang aus, und stelle für sie die Trennenergie über der Gesamtzahl von Protonen und Neutronen graphisch dar.
2. Trennt man von einem $^{15}_{6}$C-Kern ein Neutron ab, so erhält man einen $^{14}_{6}$C-Kern. Trennt man von diesem ein Neutron ab, so entsteht ein $^{13}_{6}$C- Kern, nach Abtrennen eines dritten Neutrons ein $^{12}_{6}$C-Kern usw. Wie viel Energie braucht man jeweils zum Abtrennen eines weiteren Neutrons? Stelle diese Energie graphisch dar über der Gesamtzahl von Protonen und Neutronen des jeweiligen Kohlenstoffisotops. Tue das Entsprechende für die Heliumisotope. Was fällt dir auf?

32.5 Erhaltungsgrößen

Es ist unser Ziel, vorauszusagen, was für Kernreaktionen möglich sind. Das Verfahren, das wir verwenden werden, ist dir im Prinzip bekannt. Wir werden die Tatsache ausnutzen, dass bei einer Reaktion bestimmte mengenartige Größen ihren Wert nicht verändern dürfen.

Du hast schon einige solcher Größen kennen gelernt. Man nennt sie Erhaltungsgrößen. So ist die Energie eine Erhaltungsgröße. Bei jedem Vorgang muss die Energiemenge insgesamt erhalten bleiben. Dasselbe gilt für die elektrische Ladung.

Betrachte den Vorgang, der durch die folgende Reaktionsgleichung beschrieben wird:

$$\mathrm{NaCl + H_2O \rightarrow Na + Cl^- + H_2O.}$$

Eine solche Reaktion kann nicht stattfinden, denn hier ist die Erhaltung der elektrischen Ladung verletzt. Die Edukte (linke Seite) sind insgesamt neutral, die Produkte (rechts) tragen insgesamt eine negative elektrische Ladung. Eine erlaubte Reaktion ist dagegen:

$$\mathrm{NaCl + H_2O \rightarrow Na^+ + Cl^- + H_2O.}$$

Hier stimmt die Ladungsbilanz.

Ein anderer verbotener Vorgang ist:

$$\mathrm{2\,Al + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Al_2O_3.}$$

Hier wird ein anderes Erhaltungsgesetz verletzt: Bei chemischen Reaktionen sind die Anzahlen der Atome Erhaltungsgrößen. Und die Atomzahlen stimmen auf der rechten und linken Seite der Reaktionsgleichung nicht überein. Eine mögliche Reaktion ist dagegen:

$$\mathrm{4\,Al + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Al_2O_3.}$$

> Bei chemischen Reaktionen sind die Anzahlen der Atome Erhaltungsgrößen.

Also: Um eine chemische Reaktionsgleichung einzurichten, machen wir Gebrauch von der Erhaltung der elektrischen Ladung und von der Erhaltung der Atomzahlen.

Mit der Erhaltung der Atomzahlen hat es nun noch eine Bewandtnis: Dieses Erhaltungsgesetz gilt nämlich nicht immer. Wir haben betont, dass es bei „chemischen Reaktionen“ gilt. Wir werden gleich sehen, dass es zum Beispiel nicht für Kernreaktionen gilt. Also:

> Manche Erhaltungsgesetze gelten nur unter bestimmten Bedingungen.

Wir hatten schon ein Beispiel einer Kernreaktion kennen gelernt:

$$^{13}_{6}C_K + p \rightarrow {}^{14}_{7}N_K{}^{*}.$$

Du siehst, dass links ein Kohlenstoffatomkern steht, rechts aber nicht. Auch steht links ein Proton, d.h. ein Wasserstoffatomkern und rechts nicht. Rechts dagegen steht ein Stickstoffkern und links nicht. Die Anzahl der Atome oder Atomkerne bleibt bei dieser Kernreaktion nicht erhalten.

Wir stehen nun vor einem Problem: Wir haben keine Regel für das Einrichten der Reaktionsgleichung mehr. Oder ist etwa jede beliebige Reaktionsgleichung erlaubt? Die Erfahrung zeigt, dass das keineswegs der Fall ist. Die Untersuchung von Kernreaktionen hat gezeigt, dass es noch andere, früher noch nicht bekannte Größen gibt, für die ein Erhaltungssatz gilt: die baryonische Ladung und die leptonische Ladung. Für jeden Kern, und überhaupt jedes Teilchen hat die baryonische Ladung und die leptonische Ladung einen bestimmten Wert. Die baryonische Ladung der Teilchen auf der linken Seite der Reaktionsgleichung (der Edukte) muss nun immer gleich der der rechten Seite (der Produkte) sein. Ebenso muss die leptonische Ladung von Edukten und Produkten gleich sein.

> Baryonische Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden. Leptonische Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.

Bevor wir uns mit dem Einrichten einer Kernreaktionsgleichung unter diesem neuen Gesichtspunkt befassen, müssen wir aber unsere Kenntnisse über die Elementarportionen noch etwas erweitern.

Aufgabe

1. Welche mengenartigen Größen kennst du? Welche davon sind Erhaltungsgrößen, welche nicht?

32.6 Teilchen und Antiteilchen

Beim Zerlegen von Hülle und Kern waren uns bisher drei verschiedene Arten von elementarer Materie, von elementaren Teilchen begegnet: die Elektronen, die Protonen und die Neutronen. Man hat nun außer diesen drei Teilchensorten noch einige andere entdeckt. Der größte Teil der uns umgebenden Natur besteht zwar nur aus Elektronen, Protonen und Neutronen. Die anderen Teilchen werden vorwiegend künstlich erzeugt.

Die Existenz dieser neuen Teilchen scheint die Kernreaktionen zunächst komplizierter zu machen. In Wirklichkeit lassen sich aber alle diese Teilchen in sehr systematischer und übersichtlicher Art zusammenfassen. In Tab. 32.3

Name, Symbol	Ruhenergie	Ladung elektrische*	Ladung baryonische	Ladung leptonische
Photon γ	0 pJ	0	0	0
Elektron e	0,0819 pJ	-1	0	1
Antielektron $\bar{e}$	0,0819 pJ	1	0	-1
Neutrino ν	0 pJ	0	0	1
Antineutrino $\bar{\nu}$	0 pJ	0	0	-1
Proton p	150,3277 pJ	1	1	0
Antiproton $\bar{p}$	150,3277 pJ	-1	-1	0
Neutron n	150,5349 pJ	0	1	0
Antineutron $\bar{n}$	150,5349 pJ	0	-1	0

* in Vielfachen der Elementarladung

Tab. 32.3

32 ATOMKERNE

sind sie mit einigen ihrer Eigenschaften aufgeführt. Wir wollen diese Tabelle ausführlich diskutieren.

Die alten Bekannten

In der linken Spalte stehen die Namen der Teilchen. Vier dieser Teilchen sind alte Bekannte: das Photon, das Elektron, das Proton und das Neutron.

Das Neutrino

Eigentlich sollte es auch ein alter Bekannter sein, denn die Welt ist voll davon. Es sind Teilchen, von denen sehr viele frei herumfliegen. Sie kommen vor allem von der Sonne. Sie entstehen dort in derselben Reaktion, die auch dafür verantwortlich ist, dass die Sonne Licht zu uns schickt. Man merkt von diesen Neutrinos so wenig, weil sie alle Materie fast ungehindert durchdringen. Es gibt daher fast keine Reaktion, mit der man sie nachweisen könnte. Die meisten der Sonnenneutrinos durchdringen die ganze Erde, ohne mit irgendeinem anderen Teilchen zu reagieren, oder auch nur abgelenkt zu werden.

Mithilfe der Neutrinos können wir etwas über die Reaktionen erfahren, die tief im Innern der Sonne ablaufen. Da die Neutrinos aber so wenig reaktionsfreudig sind, sind die Experimente zur Messung der Neutrinos sehr aufwendig. Die Nachweisgeräte müssen sehr groß sein, damit die Chance, dass darin ein Neutrino hängen bleibt, nicht zu klein ist. Außerdem müssen die Experimente abgeschirmt werden gegen alle anderen Teilchen, die in irgendwelchen Kernreaktionen entstehen oder aus dem Weltall kommen. Daher werden solche Experimente tief unter der Erde gemacht: in Tunneln oder in alten Bergwerken.

Nun wurde die Existenz von Neutrinos aber schon zu einer Zeit vermutet, als man an solche aufwendigen Experimente noch nicht denken konnte. Wie war das möglich? Es geschah mit einer Methode, die sich in der Mikrophysik schon öfter bewährt hat: Man untersucht eine bestimmte Reaktion und entdeckt, dass irgendein Erhaltungssatz, von dessen Gültigkeit man überzeugt ist, verletzt zu sein scheint. Im Fall der Neutrinos stellte man fest, dass die Energie bei einer bestimmten Reaktion nicht erhalten war. Man schloss daraus, dass an der Reaktion ein weiteres, bis dahin unbekanntes und unbemerktes Teilchen teilgenommen haben musste.

> Neutrinos reagieren nur sehr schwach mit anderen Teilchen.

Antiteilchen

Tab. 32.3 enthält noch vier weitere Teilchen, Die Namen dieser Teilchen beginnen alle mit dem Bestimmungswort „Anti-“: das Antielektron, das Antineutrino, das Antiproton und das Antineutron. Du überzeugst dich leicht davon, dass sie eine große Ähnlichkeit mit den entsprechenden Teilchen ohne das „Anti“ haben: Sie stimmen mit diesen völlig überein, bis auf die Vorzeichen der drei Ladungen. So hat das Proton eine positive elektrische und eine positive baryonische Ladung, das Antiproton hat negative elektrische und baryonische Ladung.

Man sagt, das Antiproton ist das Antiteilchen zum Proton, und das Proton ist das Antiteilchen zum Antiproton. Teilchen und Antiteilchen bilden also ein Pärchen von zwei sehr ähnlichen Partnern.

> Teilchen und Antiteilchen unterscheiden sich im Vorzeichen von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung.
> - Elektronen und Neutrinos, sowie deren Antiteilchen tragen leptonische Ladung.
> - Protonen und Neutronen, sowie deren Antiteilchen tragen baryonische Ladung.
> - Zum Photon gibt es kein Antiteilchen.

32.7 Ladungsbilanzen

Wir sind nun in der Lage, eine Kernreaktion einzurichten. Wir betrachten zunächst einige sehr einfache Beispiele. Gibt es eine Reaktion

$$\mathrm{n} \overset{?}{\longleftrightarrow} \mathrm{p} + \mathrm{e} \qquad (32.6)$$

bei der sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron verwandelt? Wir machen die Bilanzen von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung:

	n	p + e
elektrische Ladung	0	1 + (–1)
baryonische Ladung	1	1 + 0
leptonische Ladung	0	0 + 1

Die elektrische Ladung von Edukten und Produkten ist dieselbe, nämlich null. Die Erhaltung der elektrischen Ladung wird also befolgt. Auch die baryonische Ladung hat links und rechts denselben Wert, nämlich 1. Die leptonische Ladung dagegen bliebe bei der Reaktion nicht erhalten: Sie ist null für die linke und eins für die rechte Seite. Die Reaktion kann daher nicht stattfinden, und zwar weder von links nach rechts, noch von rechts nach links.

Wir können die Reaktionsgleichung aber leicht reparieren, etwa indem wir rechts noch ein Antineutrino hinzufügen:

$$n \overset{?}{\longleftrightarrow} p + e + \overline{\nu}$$

Diesmal stimmt die Bilanz:

	n	p + e + $\overline{\nu}$
elektrische Ladung	0	1 + (–1) + 0
baryonische Ladung	1	1 + 0 + 0
leptonische Ladung	0	0 + 1 + (–1)

Auch die leptonische Ladung ist jetzt links und rechts gleich, nämlich null. Diese Reaktion findet in der Tat statt: Ein freies Neutron zerfällt von selbst in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino.

Man kann Gleichung (32.6) auch dadurch in Ordnung bringen, dass man auf der linken Seite ein Neutrino hinzufügt:

$$n + \nu \overset{?}{\longleftrightarrow} p + e$$

Auch diese Reaktion ist erlaubt, wie die Bilanztafel zeigt:

	n + ν	p + e
elektrische Ladung	0 + 0	1 + (–1)
baryonische Ladung	1 + 0	1 + 0
leptonische Ladung	0 + 1	0 + 1

Aufgabe

1. Richte eine Gleichung ein, die die Reaktion eines Protons mit einem Antiproton beschreibt. Es gibt mehrere Möglichkeiten.

32.8 Die Reaktionsrichtung

Eine wichtige Frage ist noch offen: In welche Richtung läuft die Reaktion, die wir eingerichtet haben?

Die Entscheidung hierüber können wir wieder durch Anwendung eines Erhaltungsgesetzes treffen. Wir haben bis jetzt noch nicht die Energieerhaltung berücksichtigt. Auch die Energiebilanz einer Reaktion muss natürlich stimmen. Die Energie von Edukten und Produkten muss gleich sein. Wenn wir die Ruhenergie der Teilchen auf der einen Seite einer Reaktionsgleichung mit der der anderen Seite vergleichen, so werden wir es allerdings nie erleben, dass die Energien genau gleich sind. Tatsächlich brauchen aber die Ruhenergien auch gar nicht gleich zu sein.

Wenn die Ausgangskerne oder -teilchen ruhen, so ist die Energie der Ausgangsteilchen die Summe der Ruhenergien dieser Teilchen. Die gesamte Ruhenergie der entstehenden Teilchen darf sicher nicht größer sein als die der Ausgangsteilchen. Sie darf aber sehr wohl kleiner sein. In diesem Fall bliebe von der Energie der Ausgangsteilchen etwas übrig. Diese übrige Energie lässt sich aber immer unterbringen: Sie kann den entstehenden Teilchen einfach mitgegeben werden, indem diese in schnelle Bewegung versetzt werden. Je schneller sich die Produktteilchen bewegen, desto mehr Energie haben sie zusätzlich zu ihrer Ruhenergie. Also: Eine Kernreaktion läuft so, dass die Ruhenergie der beteiligten Kerne und Teilchen abnimmt.

Um zu entscheiden, in welche Richtung eine Reaktion läuft, müssen wir also die gesamte Ruhenergie der Teilchen der linken Seite mit der der rechten vergleichen. Die Reaktion läuft von der hohen zur niedrigen Ruhenergie.

> Eine Kernreaktion, bei der die Ausgangsteilchen ruhen, läuft stets in Richtung abnehmender Ruhenergie.

Wir gehen nun mit unseren neuen Werkzeugen an die Arbeit. Wir wollen untersuchen, in welche Richtung eine Reaktion läuft:

$$\mathrm{A + B + \ldots \overset{?}{\longleftrightarrow} U + V + \ldots}$$

Sind Neutronen stabil?

Die Reaktion

$$\mathrm{n \overset{?}{\longleftrightarrow} p + e + \overline{\nu}}$$

ist in Ordnung, was die Bilanz von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung betrifft. Wir hatten uns davon schon überzeugt. Es fehlt noch die Energiebilanz. Wir fügen sie in die Tafel mit den Ladungsbilanzen ein: die Summe der Ruhenergien der linken Seite und die Summe der Ruhenergien der rechten Seite. Wir entnehmen die Ruhenergien der einzelnen Teilchen Tab. 32.3.

	n		p + e + $\overline{\nu}$	
elektrische Ladung	0		1 + (–1) + 0	
baryonische Ladung	1		1 + 0 + 0	
leptonische Ladung	0		0 + 1 + (–1)	
Ruhenergie in pJ	n	150,5349	p	150,3277
			e	0,0819
Summe in pJ	150,535		150,410	

Die Ruhenergie des Neutrons ist größer als die von Proton, Elektron und Antineutrino zusammen. Die Reaktion läuft also von links nach rechts. Wir ziehen die kleinere Summe von der größeren ab und erhalten:

$$\Delta E = 150{,}535\ \mathrm{pJ} - 150{,}410\ \mathrm{pJ} = 0{,}125\ \mathrm{pJ}.$$

Tatsächlich beobachtet man, dass freie Neutronen, d. h. Neutronen, die nicht in einem Kern gebunden sind, von selbst zerfallen.

Man kann Neutronen künstlich erzeugen. Sie zerfallen aber, wenn man sie vorsichtig aufbewahrt, in wenigen Minuten. Tatsächlich ist ihre Lebensdauer meist noch viel kürzer, denn sie sind sehr reaktionsfreudig und verbinden sich schnell mit den verschiedensten Atomkernen, die sie antreffen.

Sind Protonen stabil?

Dass Protonen nicht zerfallen, ist dir bekannt. Wir wollen uns davon überzeugen, dass auch unser kernphysikalisches Werkzeug dieses Ergebnis liefert. Was die Bilanzen der drei Ladungen betrifft, wäre die folgende Reaktion erlaubt:

$$\mathrm{p \rightarrow n + \overline{e} + \nu}$$

Wir legen eine Tafel mit den Bilanzen an:

	p		n + $\overline{e}$ + ν	
elektrische Ladung	1		0 + 1 + 0	
baryonische Ladung	1		1 + 0 + 0	
leptonische Ladung	0		0 + (–1) + 1	
Ruhenergie in pJ	p	150,3277	n	150,5349
			$\overline{e}$	0,0819
Summe in pJ	150,328		150,617	

Die Ruhenergie des Protons ist kleiner als die von Neutron und Antielektron zusammen. Die Reaktion kann also nur von rechts nach links laufen: Das Proton kann nicht zerfallen.

Ist Tritium stabil?

Wir versuchen es mit einem Zerfall in einen Heliumkern, ein Elektron und ein Antineutrino:

$$\mathrm{{}^{3}_{1}H_K \overset{?}{\longleftrightarrow} {}^{3}_{2}He_K + e + \overline{\nu}}$$

Der Übersichtlichkeit halber tragen wir die Reaktionsgleichung in Zukunft immer als Gehaltsformel in die Tabelle ein.

$$\mathrm{pn \overset{?}{\longleftrightarrow} p_2n + e + \overline{\nu}}$$

	pn_2		p_2n + e + $\overline{\nu}$	
elektrische Ladung	1		2 + (–1) + 0	
baryonische Ladung	1		3 + 0 + 0	
leptonische Ladung	0		0 + 1 + (–1)	
Ruhenergie in pJ	p	150,3277	p	2 · 150,3277
	n	2 · 150,5349	n	150,5349
			e	0,0819
$-E_T$ in pJ		−1,359		−1,2346
Summe in pJ		450,0385		450,0376

Die Ladungsbilanzen sind in Ordnung.

Wir berechnen die Ruhenergie eines Kerns, indem wir von der Ruhenergie der Teilchen, aus denen er besteht, die Trennenergie abziehen.

$E_T(pn_2)$ und $E_T(p_2n)$ wurden aus der Tabelle abgelesen. Die linke Summe ist größer als die rechte, die Reaktion kann also von links nach rechts laufen.

Tatsächlich ist Tritium instabil. Normales Wasser enthält eine sehr geringe Menge Tritium. Dieses Tritium zerfällt gemäß der Reaktion, die wir gerade untersucht haben. In 1 kg Wasser zerfallen pro Minute etwa 45 Tritiumkerne. Wie kann es aber überhaupt sein, dass Wasser Tritium enthält? Müsste nicht alles Tritium, das aus irgendeinem Grund einmal in das Wasser hineingeraten ist, längst zerfallen sein?

Tritium zerfällt nicht nur, es wird auch ständig nachproduziert, in einer Reaktion mit der so genannten kosmischen Strahlung. Die Erde wird von einem ständigen Strom von Teilchen sehr hoher Energie — vorwiegend Protonen und Heliumkernen — getroffen. Diese Teilchen verursachen zahlreiche Kernreaktionen in der Atmosphäre. Auf diese Art entstehen viele instabile Nuklide.

Der Zerfall von $^{14}_{6}\mathrm{C}_\mathrm{K}$

Durch die kosmische Strahlung wird auch das instabile Kohlenstoffisotop $^{14}_{6}\mathrm{C}$ produziert. Es zerfällt gemäß

$$^{14}_{6}\mathrm{C}_\mathrm{K} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N}_\mathrm{K} + \mathrm{e} + \overline{\nu}$$

oder

$$\mathrm{p}_6\mathrm{n}_8 \rightarrow \mathrm{p}_7\mathrm{n}_7 + \mathrm{e} + \overline{\nu}. \qquad (32.7)$$

Wir schreiben von jetzt an für die Energiebilanz alle die Beiträge nicht mehr auf, die sich in der Rechnung sowieso wegheben: die Ruhenergien derjenigen Teilchen, die in der Gehaltsformel sowohl links als auch rechts auftreten. So berücksichtigen wir im Fall von Gleichung (32.7) nicht mehr 6 Protonen und 7 Neutronen. Auf der linken Seite verbleibt dann 1 Neutron und auf der rechten Seite 1 Proton.

Die Bilanztafel sieht dann so aus:

	$\mathrm{p}_6\mathrm{n}_8$		$\mathrm{p}_7\mathrm{n}_7 + \mathrm{e} + \overline{\nu}$	
elektrische Ladung		6		7 + (–1) + 0
baryonische Ladung		14		14 + 0 + 0
leptonische Ladung		0		0 + 1 + (–1)
Ruhenergie in pJ	n	150,5349	p	150,3277
			e	0,0819
$-E_T$ in pJ		–16,87		–16,77
Summe in pJ		133,66		133,64

Die linke Summe ist größer als die rechte, die Reaktion kann ablaufen.

Der Zerfall von Uran

Die Isotope des Urans können auf sehr viele verschiedene Arten zerfallen. Wir betrachten als Beispiel eine der vielen Zerfallsmöglichkeiten des Uranisotops $^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K}$, den Zerfall in Barium und Krypton:

$$^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba}_\mathrm{K} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr}_\mathrm{K} + 2\,\mathrm{n}.$$

	$\mathrm{p}_{92}\mathrm{n}_{143}$	$\mathrm{p}_{56}\mathrm{n}_{85} + \mathrm{p}_{36}\mathrm{n}_{56} + 2\,\mathrm{n}$
elektrische Ladung	92	56 + 36 + 0
baryonische Ladung	235	141 + 92 + 2
leptonische Ladung	0	0 + 0 + 0
$-E_T$ in pJ	–285,80	–188,09 – 129,78
Summe in pJ	–285,80	–317,87

Diese Reaktion ist eine von vielen, die im Kernreaktor zur Energiegewinnung ausgenutzt werden.

Die Synthese von Kohlenstoff

Wir untersuchen eine Reaktion, die in Sternen abläuft, und die für die Entstehung des Kohlenstoffs im Universum zuständig ist:

$$3\,{}^{4}_{2}\mathrm{He}_\mathrm{K} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C}_\mathrm{K}.$$

	$3\,\mathrm{p}_2\mathrm{n}_2$	$\mathrm{p}_6\mathrm{n}_6$
elektrische Ladung	3 · 2	6
baryonische Ladung	3 · 4	12
leptonische Ladung	0	0
$-E_T$ in pJ	–3 · 4,53	–14.77
Summe in pJ	–13,59	–14,77

Dass diese Reaktion auf der Erde normalerweise nicht abläuft, liegt an dem hohen Reaktionswiderstand. Vermindern kann man den Widerstand mit den in der Chemie üblichen Methoden: durch Temperaturerhöhung oder Verwendung eines Katalysators. Da es sich um eine Kernreaktion handelt, ist die Temperatur, bei der die Reaktion zu laufen beginnt, aber sehr hoch: Sie muss über 100 Millionen Kelvin betragen. In Sternen wird diese Temperatur erreicht.

Aufgaben

1. Prüfe, ob Deuterium auf eine der folgenden Arten zerfallen kann:
   $\mathrm{pn} \to \mathrm{p} + \mathrm{n} \qquad \mathrm{pn} \to 2\,\mathrm{p} + \mathrm{e} + \overline{\nu} \qquad \mathrm{pn} \to 2\,\mathrm{n} + \overline{\mathrm{e}} + \nu$
2. Das Kaliumisotop ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$ ist instabil. Nach welchen der folgenden Reaktionen kann es zerfallen?
   ${}^{40}_{19}\mathrm{K_K} \to {}^{20}_{9}\mathrm{F_K} + {}^{20}_{10}\mathrm{Ne_K}$
   ${}^{40}_{19}\mathrm{K_K} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He_K} + {}^{36}_{17}\mathrm{Cl_K}$
   ${}^{40}_{19}\mathrm{K_K} \to {}^{40}_{20}\mathrm{Ca_K} + \mathrm{e} + \overline{\nu}$
   ${}^{40}_{19}\mathrm{K_K} \to {}^{40}_{18}\mathrm{Ar_K} + \overline{\mathrm{e}} + \nu$
3. Prüfe, welche der beiden Reaktionen ablaufen kann:
   ${}^{14}_{6}\mathrm{C_K} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He_K} + {}^{8}_{4}\mathrm{Be_K}$
   ${}^{14}_{6}\mathrm{C_K} \to 2\,{}^{7}_{3}\mathrm{Li_K}$
4. In der Sonne reagieren vier Protonen zu einem ${}^{4}_{2}$He-Kern. Welche Teilchen entstehen dabei außerdem? Stelle die Energiebilanz der Reaktion auf.

32.9 Kernstrahlung

Wenn man sich ein bestimmtes Nuklid vornimmt, um zu entscheiden, ob es stabil ist oder nicht, müsste man alle Zerfallsmöglichkeiten untersuchen. Man würde dabei feststellen, dass es für viele der Nuklide eine ganze Reihe verschiedener solcher Möglichkeiten gibt.

Die Beobachtung zeigt nun allerdings oft, dass das Nuklid doch stabil ist. Es zerfällt nicht, obwohl es von der Bilanz der drei Ladungen und der Energie her erlaubt wäre. Der Grund hierfür ist, dass der Reaktionswiderstand zu hoch ist – eine Erscheinung, die wir auch aus der Chemie kennen.

Und man macht noch eine andere Beobachtung: Die meisten der Zerfallsreaktionen, die tatsächlich stattfinden, lassen sich in einige wenige Klassen einteilen. Um diese Klassen geht es im Folgenden. Das Gemeinsame dieser typischen Reaktionen ist, dass eines der Reaktionsprodukte ein sehr kleines Teilchen ist: ein Elektron, ein Antielektron, ein Neutrino oder ein ${}^{4}_{2}$He-Kern.

> Bei den häufigsten Zerfallsreaktionen ist eines der Reaktionsprodukte ein kleines Teilchen.

Entstehung eines Elektrons

Ein Beispiel ist der Zerfall des Kohlenstoffisotops ${}^{14}_{6}$C, den wir im vorigen Abschnitt untersucht haben, siehe Gleichung (32.7).

Entstehung eines Antielektrons

Bei einem anderen häufigen Reaktionstyp ist eines der Reaktionsprodukte ein Antielektron. Das ${}^{40}_{19}$K kann auf diese Art zerfallen:

$$ {}^{40}_{19}\mathrm{K_K} \to {}^{40}_{18}\mathrm{Ar_K} + \overline{\mathrm{e}} + \nu . $$

Wir überprüfen, ob die Reaktion tatsächlich erlaubt ist:

	$\mathrm{p_{19}n_{21}}$	$\mathrm{p_{18}n_{22}} + \overline{\mathrm{e}} + \nu$
elektrische Ladung	19	18 + 1 + 0
baryonische Ladung	40	40 + 0 + 0
leptonische Ladung	0	0 + (–1) + 1
Ruhenergie in pJ	p 150,3277	n 150,5349
	0	$\overline{\mathrm{e}}$ 0,0819
$-E_T$ in pJ	–54,72	–55,08
Summe in pJ	95,61	95,54

Die linke Summe ist größer als die rechte, die Reaktion ist also erlaubt.

Entstehung eines ${}^{4}_{2}$He-Kerns

Ein Beispiel für diesen Reaktionstyp ist der Zerfall des Radiumisotops ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra_K}$ in ein Radonisotop und einen Kern des Heliumisotops ${}^{4}_{2}\mathrm{He_K}$:

$$ {}^{226}_{88}\mathrm{Ra_K} \to {}^{222}_{86}\mathrm{Rn_K} + {}^{4}_{2}\mathrm{He_K} . $$

	$\mathrm{p_{88}n_{138}}$	$\mathrm{p_{86}n_{136}} + \mathrm{p_2n_2}$
elektrische Ladung	88	86 + 2
baryonische Ladung	226	222 + 4
leptonische Ladung	0	0 + 0
Ruhenergie in pJ	0	0
$-E_T$ in pJ	–277,43	–273,68 – 4,5334
Summe in pJ	–277,43	–278,21

Bei den meisten Kernreaktionen, mit denen wir es zu tun haben, reagieren nur winzige Mengen. Der Reaktionsumsatz ist sehr, sehr gering — verglichen mit dem Umsatz bei einer typischen chemischen Reaktion. Es entsteht gewöhnlich so wenig von den Reaktionsprodukten, dass sie selbst mit den empfindlichsten Waagen nicht nachzuweisen sind. Man könnte denken, dass daher der Nachweis, dass überhaupt eine Kernreaktion stattgefunden hat, sehr schwierig ist. Nun macht sich aber der Ablauf einer Kernreaktion häufig doch sehr deutlich bemerkbar. Wenn nämlich eines der entstehenden Teilchen ein leichtes Teilchen ist, nimmt dieses den größten Teil der bei der Reaktion übrigen Energie ΔE mit. Es fliegt mit sehr hoher Geschwindigkeit weg und kann darum auf die verschiedensten Arten nachgewiesen werden.

Während man zum Nachweis des Ablaufs einer Reaktion mit chemischen Methoden typischerweise mindestens eine Milliarde Moleküle braucht, so kann man die genannten Kernzerfallsreaktionen schon erkennen, wenn nur ein einziger Kern zerfällt.

Dass es überhaupt Reaktionen der Kerne gibt, wurde auf diese Art entdeckt: Man stellte fest, dass bestimmte Stoffe eine unbekannte „Strahlung" abgeben: irgendwelche sich schnell bewegenden Teilchen. Man sagte auch, diese Stoffe seien radioaktiv. Da die schnellen Teilchen bei Kernreaktionen entstehen, wollen wir sie Kernstrahlung nennen. Oft spricht man auch von „radioaktiver Strahlung". Nun bedeutet das Wort radioaktiv strahlungsaktiv (radius = Strahl). Es ist aber der zerfallende Stoff, der radioaktiv ist, nicht dagegen die Strahlung.

Man hatte zunächst nur drei verschiedene Arten von Kernstrahlung entdeckt, die sich in der elektrischen Ladung unterschieden. (Die Ladung der Teilchen war leicht festzustellen.) Bevor man genau wußte, um was es sich handelt, wurden diese drei zuerst entdeckten Strahlungsarten mit Namen versehen: Die Teilchen, die später als Heliumkerne identifiziert wurden, nannte man α-Strahlen, die schnellen Elektronen wurden β-Strahlen genannt. Außerdem wurden bei vielen Reaktionen Photonen hoher Energie abgegeben, nämlich immer dann, wenn sich das Reaktionsprodukt zunächst in einem angeregten Zustand befindet. Diese Photonen wurden γ- Strahlen genannt.

Die Namen α-, β- und γ-Strahlen haben sich bis heute erhalten, obwohl wir wissen, dass es sich dabei ganz einfach um irgendwelche normalen Reaktionsprodukte handelt, und dass es noch viele andere Reaktionsprodukte gibt, die keinen zusätzlichen Namen bekommen haben.

> Während man zum Nachweis des Ablaufs einer Reaktion mit chemischen Mitteln sehr viele Teilchen braucht, kann man bei einer Kernreaktion oft den Zerfall eines einzigen Kerns nachweisen.

Wir hatten gesagt, dass bei den meisten Zerfällen instabiler Nuklide eines der Reaktionsprodukte ein Elektron, ein Antielektron oder ein Heliumkern ist. Dieses Verhalten wird in Abb. 32.6 besonders deutlich. Die Abbildung zeigt eine stark vereinfachte Version der Nuklidkarte von Abb. 32.2.

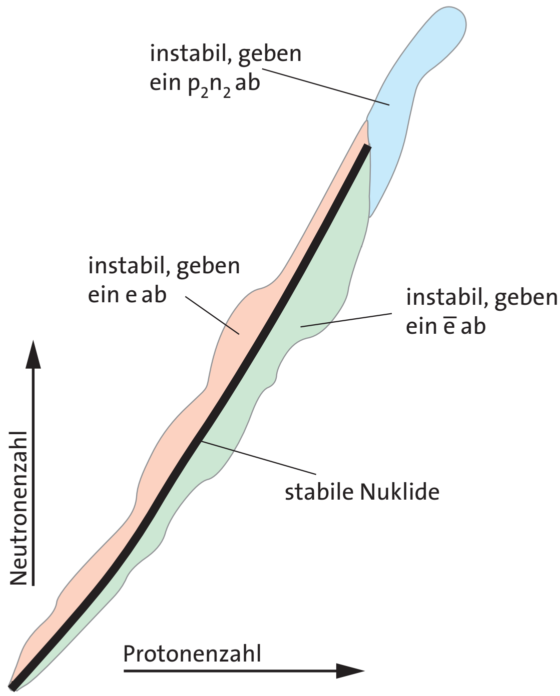


Abb. 32.6 Nuklidkarte, stark vereinfacht

Kernstrahlung ist bei zu hoher Intensität für Menschen und andere Organismen gefährlich.

Daher gelten für den Umgang mit radioaktiven Stoffen strenge Sicherheitsbestimmungen. In unserer natürlichen Umgebung befinden sich aber auch radioaktive Stoffe, sodass wir stets einer geringen Kernstrahlung ausgesetzt sind.

Aufgaben

1. Welches der drei Teilchen e, $\overline{e}$ und ${}^{4}_{2}He_K$ entsteht beim Zerfall von
   a) ${}^{61}_{29}Cu$
   b) ${}^{66}_{29}Cu$,
   c) ${}^{228}_{90}Th$.
2. Zeige, dass die Bilanz der drei Ladungen bei der Reaktion
   $${}^{55}_{26}Fe \rightarrow {}^{55}_{25}Mn + \nu\ .$$
   in Ordnung ist. Beachte, dass hier nicht die Symbole der Kerne, sondern die der ganzen Atome, einschließlich Hülle, stehen. Die Reaktion kommt tatsächlich vor. Beschreibe in Worten, was dabei passiert. Stelle die Energiebilanz auf.
3. (a) Wir betrachten die Zerfallsreaktion eines instabilen Nuklids A, bei der ein Nuklid B und ein Elektron entstehen:
   $$A_K \rightarrow B_K + e + \overline{\nu}\,.$$
   Wo liegt das Nuklid A in der Nuklidkarte? Wo liegt A relativ zu B?
   (b) Wo liegen die Nuklide C und D, die in der Zerfallsreaktion $C_K \rightarrow D_K + \overline{e} + \nu$ auftreten?
   (c) Wo liegen die Nuklide E und F, die in der Zerfallsreaktion $E_K \rightarrow F_K + p_2n_2$ auftreten?

32.10 Die Umsatzrate von Kernreaktionen

Dass wir von Kernreaktionen im täglichen Leben so wenig merken, liegt daran, dass diese Reaktionen im Allgemeinen sehr langsam ablaufen. Wie schnell eine Reaktion abläuft, sagt uns die Umsatzrate der Reaktion:

$$\text{Umsatzrate} = \frac{\text{Umsatz}}{\text{Zeitdauer}}.$$

oder in Symbolen:

$$I_n = \frac{n}{t}.$$

Der Umsatz n ist ein Maß für die umgesetzte Menge. Bei chemischen Reaktionen gibt man ihn in der Maßeinheit mol an, sodass sich für die Umsatzrate die Einheit mol/s ergibt.

Bei Kernreaktionen sind nun die Umsatzraten so gering, dass man auch mit den bekannten Bestimmungswörtern wie nano, pico oder femto nicht mehr auskommt. Man gibt daher den Umsatz nicht mehr in mol an, sondern durch die Anzahl der Elementarreaktionen: die Anzahl der Kerne, die zerfallen sind, oder die gebildet worden sind.

Bekanntlich entsprechen einem mol $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen oder „Elementarmengen“:

$$1\text{ mol} = 6 \cdot 10^{23}\text{ Elementarmengen}$$

Die Umsatzrate misst man entsprechend durch die Anzahl der Elementarmengen

$$1\frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23}\,\frac{\text{Elementarmengen}}{\text{s}}.$$

Der Einheit „Elementarmenge pro Sekunde“ hat man einen eigenen Namen gegeben: Becquerel, abgekürzt Bq. Es ist also:

$$1\frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23}\,\text{Bq}.$$

Beispiel

Wir hatten früher gesehen, dass ein sehr geringer Teil des Wasserstoffs von gewöhnlichem Wasser das Wasserstoffisotop Tritium ist. Dieses Tritium zerfällt nach der Reaktionsgleichung

$${}^{3}_{1}H_K \rightarrow {}^{3}_{2}He_K + e + \overline{\nu}\,.$$

Die Umsatzrate in einem Kubikmeter normalem Wasser beträgt etwa

$$I_n = 750\text{ Bq}.$$

Zum Vergleich betrachten wir eine chemische Reaktion, die als langsam gilt: das Rosten eines Autos.

Nehmen wir an, es bilde sich 1 mol Rost pro Jahr. Es ist also

$$I_n = \frac{1\text{ mol}}{1\text{ Jahr}} = \frac{1\text{ mol}}{32 \cdot 10^{6}\text{s}}$$
$$= \frac{1}{32 \cdot 10^{6}}\,6 \cdot 10^{23}\,\text{Bq} = 1{,}9 \cdot 10^{16}\,\text{Bq}.$$

Der Vergleich zeigt einen typischen Unterschied zwischen chemischen und Kernreaktionen: Die meisten Kernreaktionen, mit denen wir es zu tun haben, haben sehr viel geringere Umsatzraten als typische chemische Reaktionen. Die Mengen der chemischen Elemente auf der Erde ändern sich durc h Kernreaktionen also nur sehr, sehr wenig.

> Die Umsatzraten von typischen Kernreaktionen sind sehr viel kleiner als die von typischen chemischen Reaktionen.

Oft möchte man eine chemische Reaktion beschleunigen, man möchte die Umsatzrate vergrößern. Man kann das mit zwei verschiedenen Methoden erreichen:

- durch Erhöhen der Temperatur;
- durch Zugabe eines Katalysators (eines Stoffs, dessen Menge sich beim Reaktionsablauf nicht ändert).

Genauso kann man nun bei Kernreaktionen verfahren. Man kann die Umsatzrate durch Temperaturerhöhung oder durch Verwendung eines Katalysators vergrößern.

Um die Umsatzrate durch Temperaturerhöhung merklich zu vergrößern, sind allerdings Temperaturen von vielen Millionen Kelvin erforderlich. Solche Bedingungen herrschen in der Sonne und in anderen Sternen. Tatsächlich funktioniert die Energieproduktion in Sonne und Sternen über Kernreaktionen. Ein anderes Beispiel für die Erhöhung der Umsatzrate mithilfe hoher Temperaturen ist der Fusionsreaktor, eine Anlage, die sich noch im Entwicklungsstadium befindet, und die eines Tages der Produktion elektrischer Energie dienen soll.

Die katalytische Beschleunigung einer Kernreaktion geschieht im Kernreaktor. Als Katalysator wirken hier Neutronen.

Wir werden uns mit diesen Vorgängen noch beschäftigen: mit Kernreaktionen im Kernreaktor und in der Sonne.

> Kernreaktionen lassen sich wie chemische Reaktionen beschleunigen durch
> - Temperaturerhöhung;
> - Verwendung eines Katalysators.

Aufgabe

1. Natürliches Uran enthält 99,28 % des Isotops $^{238}_{92}\text{U}$ und 0,72 % des Isotops $^{235}_{92}\text{U}$. Wie viel mol des Isotops $^{235}_{92}\text{U}$ enthält ein kg natürlichen Urans?

   Das Isotop $^{235}_{92}\text{U}$ wird im Kernreaktor zur Energiegewinnung verwendet. Wenn es sich noch nicht im Reaktor befindet, zerfällt es von selbst nach der Reaktionsgleichung

   $^{235}_{92}\text{U}_\text{K} \to {}^{231}_{90}\text{Th}_\text{K} + {}^{4}_{2}\text{He}_\text{K}$.

   Die Umsatzrate für 1 kg des natürlichen Uranisotopengemischs beträgt für diese Reaktion

   $I_n = 5{,}76 \cdot 10^5$ Bq.

   Rechne die Umsatzrate in mol/s um. Wie lange dauert es, bis 1 % des $^{235}_{92}\text{U}$ zerfallen ist?

32.11 Die Halbwertszeit

Das Phosphorisotop $^{30}_{15}\text{P}_\text{K}$ ist instabil. Es zerfällt gemäß

$$^{30}_{15}\text{P}_\text{K} \to {}^{30}_{14}\text{Si}_\text{K} + \overline{e} + \nu\,.$$

Wir betrachten einen einzelnen Kern dieses Phosphorisotops. Er kann zerfallen, und er wird zerfallen — aber wann? Die Frage hat dieselbe Antwort wie eine andere Frage, die wir früher schon gestellt und auch beantwortet hatten. Der Zeitpunkt, zu dem die Reaktion stattfindet, ist unbestimmt. Das bedeutet aber nicht, dass absolute Willkür herrscht. Denn die Wahrscheinlichkeit, mit der der Kern in einem bestimmten Zeitintervall zerfällt, liegt ganz genau fest. Im Fall unserer Reaktion ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Kern in 2,5 Minuten zerfällt, 50 %. Es ist so, als würde der Kern alle 2,5 Minuten eine Münze werfen. Je nachdem, ob er Kopf oder Zahl geworfen hat, wird er dann innerhalb der nächsten 2,5 Minuten zerfallen oder nicht.

Falls der Kern mehrere Zerfallsmöglichkeiten hat — und das ist bei vielen Kernen der Fall —, so „erwürfelt“ er auch noch, auf welche Art er zerfallen soll.

Wir betrachten nun eine sehr große Anzahl von $^{30}_{15}\text{P}_\text{K}$-Kernen, sagen wir eine Million. Wir wissen dann, dass von diesen nach 2,5 Minuten nur noch die Hälfte übrig ist, die andere Hälfte ist zerfallen. Nach 2,5 Minuten sind also noch etwa

500 000 Phosphorkerne übrig. Nach weiteren 2,5 Minuten bleiben noch etwa 250 000, noch einmal 2,5 Minuten später 125 000 usw., Abb. 32.7.

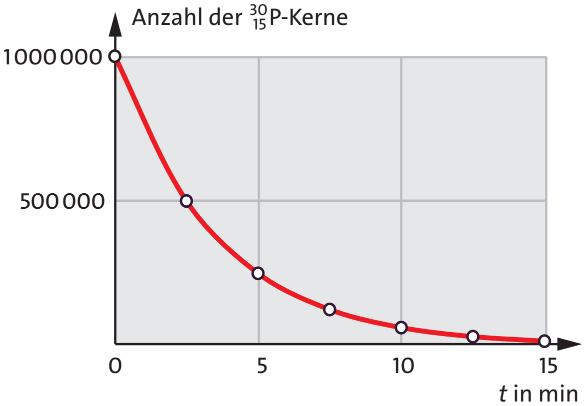


Abb. 32.7 Die Anzahl der $^{30}_{15}$P-Kerne nimmt in jedem 2,5-Minuten-Intervall auf die Hälfte ab.

Die Anzahl der Siliziumkerne oder der Antielektronen oder Neutrinos nimmt entsprechend zu. Sie beträgt nach 2,5 Minuten 500 000, nach 5 Minuten 750 000, nach 7,5 Minuten 875 000 usw., Abb. 32.8.

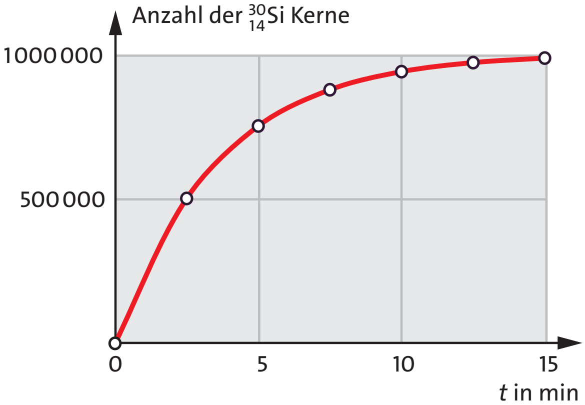


Abb. 32.8 Die Anzahl der $^{30}_{14}$Si -Kerne nimmt zu.

Wie schon früher, nennen wir die Zeitspanne, in der die Menge des reagierenden Stoffs auf die Hälfte abgenommen hat, die Halbwertszeit $T_{1/2}$. Für unser Phosphorisotop ist also

$$T_{1/2} = 2{,}5 \text{ min.}$$

Die Halbwertszeit ist die Zeitspanne, in der die Hälfte der Menge eines Stoffs zerfallen ist.

Aufgaben

1. Ein instabiles Nuklid habe eine Halbwertszeit von 5 Minuten. Wie viele von den ursprünglich vorhandenen 400 000 Kernen sind nach 20 Minuten etwa noch übrig?
2. Die Menge eines Nuklids, dessen Halbwertszeit 2 Jahre beträgt, hat von ursprünglich $8 \cdot 10^8$ auf $1 \cdot 10^8$ abgenommen. Wie viele Jahre sind vergangen?
3. Die Menge eines Nuklids hat in 4 Monaten auf 1/16 der Anfangsmenge abgenommen. Wie ist die Halbwertszeit?
4. Ein Nuklid A zerfällt mit einer Halbwertszeit von 2 Tagen in ein Nuklid B (plus zwei schnelle Teilchen) und dann weiter mit einer Halbwertszeit von 120 Jahren in ein Nuklid C. Zum Zeitpunkt t_0 liegt reines A vor. Wie ist die prozentuale Zusammensetzung des Gemischs der Kerne A, B und C zu den Zeitpunkten
   $t_0 = 0$ Jahre,
   $t_1 = 2$ Jahre,
   $t_2 = 1\,000\,000$ Jahre?
5. Wie du weißt, nimmt die Menge eines Stoffs, dessen Kerne instabil sind, innerhalb der Halbwertszeit auf die Hälfte ab. Um welchen Faktor nimmt die Umsatzrate in diesem Zeitintervall ab?

32.12 Die Sonne

Die Sonne „funktioniert" mithilfe von Kernreaktionen. Mit funktionieren ist gemeint: Die Energie, die mit dem Licht von der Sonne kommt, wird von Kernreaktionen geliefert.

Die Sonne ist ein Stern. Es gibt im Universum noch unzählige andere Sterne, die genauso aufgebaut sind wie die Sonne, und in denen dieselben Prozesse ablaufen. Dass wir die Sonne größer sehen als die anderen Sterne, liegt nur daran, dass wir der Sonne viel näher sind.

Um uns eine Vorstellung von Größe, Masse, Temperatur und Zusammensetzung der Sonne zu

		Erde	Sonne
Masse		$6 \cdot 10^{24}$ kg	$2 \cdot 10^{30}$ kg
Radius		6 000 km	700 000 km
Dichte	innen außen	17 g/cm³ 3 g/cm³	100 g/cm³ 0,0001 g/cm³
Temperature	innen außen	6000 K 300 K	15 000 000 6000 K
Zusammensetzung (Die Prozentwerte beziehen sich auf die Masse.)		35 % Fe 30 % O 15 % Si 13 % Mg 7 % andere	75 % H 23 % He 2 % andere

Tab. 32.4

machen, vergleichen wir sie mit der Erde. Die wichtigsten Daten sind in Tab. 32.4 zusammengefasst. Besonders interessant ist die Dichteverteilung der Sonne.

Abb. 32.9 zeigt, dass die Dichte außerhalb des halben Sonnenradius sehr gering ist. 90 % der Masse der Sonne befindet sich innerhalb des halben Radius. Man kann also fast sagen, die Sonne sei in Wirklichkeit nur halb so groß wie sie aussieht.

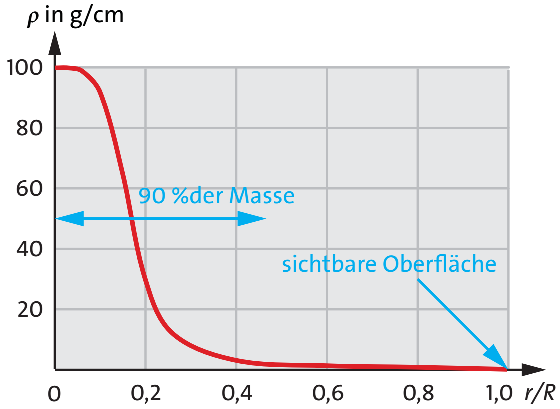


Abb. 32.9 Die Dichte der Sonne als Funktion des Abstands vom Zentrum. Der Abstand r wurde in Einheiten des Sonnenradius *R* aufgetragen. Man sieht, dass sich der weitaus größte Teil der Sonnenmasse innerhalb des halben Radius, also innerhalb von $r/R = 0{,}5$ befindet.

Beachte auch, woraus die Sonne besteht: fast nur aus Wasserstoff und Helium.

> Die Sonne besteht fast nur aus Wasserstoff und Helium.

Die Sonne gibt Licht ab und mit dem Licht Energie. Der Energiestrom, der die Sonne auf diese Art verlässt, ist sehr groß. Er beträgt

$$P = 4 \cdot 10^{26}\ \mathrm{W}.$$

Nur der zweimilliardste Teil davon trifft die Erde. Dies sind immer noch

$$P = 2 \cdot 10^{17}\ \mathrm{W}.$$

Woher nimmt die Sonne diese Energie? Im Innern der Sonne läuft eine Kernreaktion ab. Wasserstoff verwandelt sich in Helium nach der Reaktionsgleichung

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H}_K \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}_K + 2\,\overline{e} + 2\,\nu\,.$$

Wir prüfen die Bilanz der Reaktion:

	4 p	$p_2n_2 + 2\overline{e} + 2\nu$
elektrische Ladung	$4 \cdot 1$	$2 + 2 \cdot 1 + 0$
baryonische Ladung	$4 \cdot 1$	$4 + 0 + 0$
leptonische Ladung	0	$0 + 2 \cdot (-1) + 2 \cdot 1$
Ruhenergie in pJ	2 p $2 \cdot 150{,}3277$	2 n $2 \cdot 150{,}5349$
		$2\overline{e}$ $2 \cdot 0{,}0819$
$-E_T$ in pJ	0,0	−4,5334
Summe in pJ	300,655	296,700

Es bleibt pro Elementarumsatz ein Energiebetrag von $\Delta E = 3{,}956$ pJ übrig. Mit dieser Energie wird bei der Reaktion Entropie produziert: Es wird heiß.

Unter normalen Umständen – d. h. Umständen, die wir Erdmenschen normal nennen – läuft die Heliumsynthesereaktion allerdings gar nicht ab: Der Reaktionswiderstand ist viel zu hoch. Die Reaktion kommt in der Sonne nur dadurch in Gang, dass dort eine sehr hohe Temperatur herrscht. Tatsächlich läuft die Reaktion nur im Innern der Sonne, dort, wo die Temperatur etwa 15 Millionen Kelvin beträgt. Für uns Erdbewohner ist dies eine gewaltige Temperatur. Für Kernreaktionen ist sie allerdings nicht sehr hoch. Man sieht das daran, dass die Reaktion, die wir gerade untersuchen, auch bei 15 000 000 K noch recht langsam läuft. Der Reaktionsumsatz von 1 Liter Sonnenmaterie aus dem Sonneninnern, also dort, wo es am heißesten ist, beträgt nur etwa

$$\begin{aligned} I_n &= 2{,}5 \cdot 10^9\ \mathrm{Bq} \\ &= 2{,}5 \cdot 10^9 \text{ Elementarumsätze pro Sekunde.} \end{aligned}$$

Vergleiche noch einmal mit dem rostenden Auto, für das wir etwa $2 \cdot 10^{16}$ Bq berechnet hatten.

Es ist beruhigend, das zu wissen: Ein Auto ist in einigen Jahrzehnten total verrostet. Die Sonne dagegen „funktioniert“ schon seit etwa 5 Milliarden Jahren, und sie hat noch genügend „Brennstoff“, nämlich Wasserstoff, um noch einmal so lange zu scheinen.

Wegen der geringen Umsatzrate ist auch die Energiemenge, die ein Liter Sonne pro Sekunde liefert, nicht sehr groß. Wir erhalten den Energiestrom, indem wir den Reaktionsumsatz I_n (in der Maßeinheit Becquerel) mit der Energie multiplizieren, die pro Elementarumsatz abgegeben wird, also mit 3,956 pJ:

$$P = 2{,}5 \cdot 10^9 \cdot 3{,}956 \text{ pJ/s} = 2{,}5 \cdot 10^9 \cdot 3{,}956 \cdot 10^{-12} \text{ J/s} = 0{,}01 \text{ W}.$$

Der Energiestrom, der aufgrund der Kernreaktion aus jedem Liter Sonne herauskommt, beträgt also 0,01 W.

Wir vergleichen mit anderen, uns vertrauteren Energielieferanten: Eine gewöhnliche irdische Flamme mit einem Volumen von 1 Liter produziert etwa 1000 W, also 100 000-mal so viel wie 1 Liter Sonne.

Dass die Sonne insgesamt so viel Energie abgibt, liegt an dem großen Volumen des Reaktors „Sonne“.

Eine Frage ist noch nicht geklärt: Wie kommt es, dass im Innern der Sonne so hohe Temperaturen entstehen, obwohl doch die Reaktion sehr langsam läuft?

Dass trotz eines sehr geringen Reaktionsumsatzes sehr hohe Temperaturen entstehen können, kennen wir auch von Erscheinungen auf der Erde, etwa von einem Heuhaufen. Wir stellen uns vor, das Heu sei gerade frisch angehäuft worden. In frischem Heu läuft nun eine ganz langsame Reaktion ab, bei der ganz wenig Entropie entsteht. Der Heuhaufen wird sich also ganz langsam erwärmen. Da das Innere des Heuhaufens von der Außenwelt sehr gut wärmeisoliert ist, wird die Temperatur sehr hoch. Irgendwann hört die Temperaturzunahme allerdings auf. Durch die höhere Temperatur im Innern wird Entropie von innen nach außen abfließen. Die Temperatur wird nur so lange wachsen, bis die abfließende Entropie gleich der erzeugten ist: Ein Fließgleichgewicht stellt sich ein. Die Temperatur, die sich im Innern einstellt, ist umso höher, je größer der Weg ist, den die Entropie von drinnen nach draußen überwinden muss. Sie kann bei einem großen Heuhaufen so hohe Werte erreichen, dass sich das Heu entzündet. Daher muss man von Zeit zu Zeit die Temperatur im Innern des Haufens messen.

Genau dieser Heuhaufeneffekt ist nun auch für die hohe Temperatur im Innern der Sonne verantwortlich, und man versteht auch leicht, warum die Temperatur im Innern der Sonne so riesige Werte angenommen hat. Weil die Sonne sehr groß ist, ist auch der Weg zwischen der Reaktionszone im Innern und der Oberfläche sehr groß: einige 100 000 km. Damit die Entropie diese Strecke überwinden kann, hat sich ein Temperaturunterschied von einigen Millionen Kelvin aufbauen müssen.

> In der Sonne werden in einer Kernreaktion aus Wasserstoffkernen Heliumkerne produziert. Der Reaktionsumsatz ist trotz der hohen Temperatur sehr gering. Die bei der Reaktion übrige Energie wird mit Entropie aus der Reaktionszone nach außen transportiert. Damit ein Fließgleichgewicht für die Entropie aufrechterhalten werden kann, muss die Sonne im Innern sehr viel heißer sein als außen.

Aufgaben

1. Wie viel Energie wird in der Sonne bei der Bildung von 1 mol Helium abgegeben? Vergleiche mit der Energie, die bei der gewöhnlichen Verbrennung von 1 mol Wasserstoff (d. h. Reaktion mit Sauerstoff) abgegeben wird.
2. Jeder Mensch produziert Wärme: Er gibt Energie und Entropie ab. Schätze ab, wie viel Energie „1 Liter Mensch“ abgibt. Vergleiche mit der Energie, die 1 Liter Sonne abgibt.
3. Ein Stern wie die Sonne entsteht im Weltraum von selbst, und zwar aus gleichmäßig verteiltem Wasserstoff, der allerdings eine sehr, sehr geringe Dichte hat. Versuche, den Entstehungsprozess zu beschreiben.

32.13 Der Kernreaktor

Das Kernkraftwerk

Abb. 32.10 zeigt den Aufbau eines Kernkraftwerks.

Die Funktionsweise eines Kernkraftwerks ist der eines Kohlekraftwerks sehr ähnlich. In beiden wird Wasserdampf erzeugt, der einen hohen Druck und eine hohe Temperatur hat. Hierzu wird Entropie auf hoher Temperatur gebraucht.

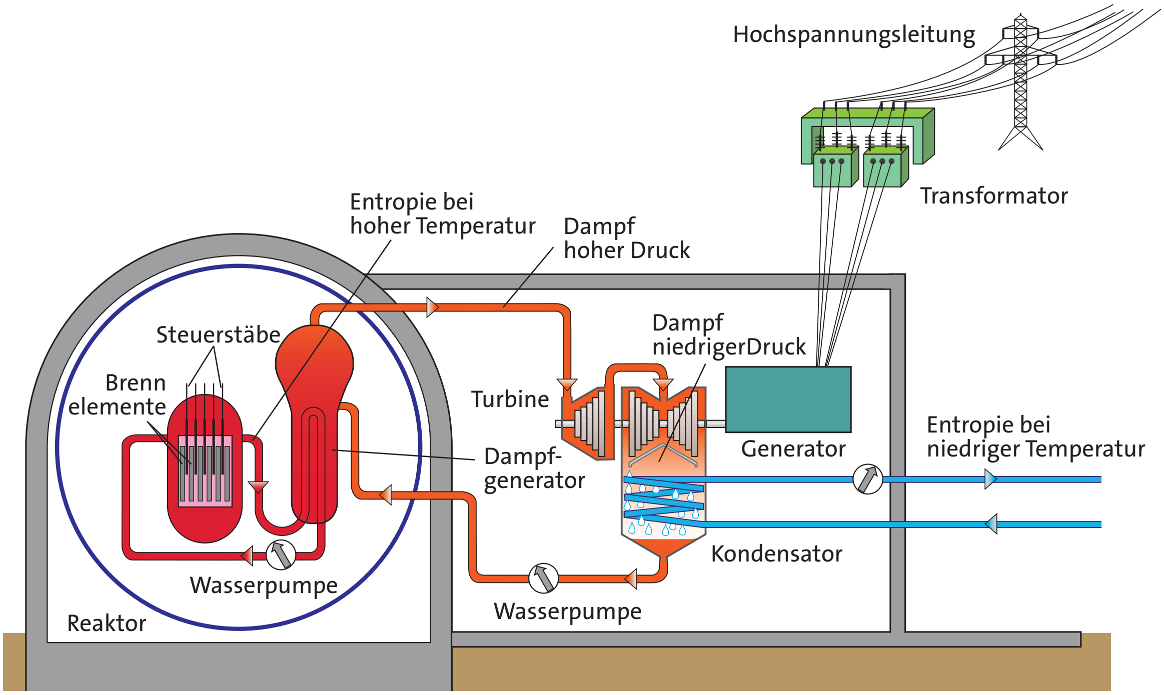


Abb. 32.10 Aufbau eines Kernkraftwerks

Diese wird im Kohlekraftwerk im Heizkessel erzeugt, indem man Kohle verbrennt. Beim Kernkraftwerk geschieht die Entropieerzeugung im Kernreaktor. Die Energie hierfür liefert eine Kernreaktion.

Die Entropie wird vom Reaktor mit dem Wasser des Primärkreislaufs konvektiv zum Dampferzeuger gebracht. (Der Primärkreislauf funktioniert wie eine Zentralheizung: Auch bei der Zentralheizung wird Entropie mit Wasser konvektiv von einer Stelle — dem Heizkessel — zu einer anderen — den Heizkörpern — gebracht.)

Im Dampferzeuger wird aus dem flüssigen Wasser des Sekundärkreislaufs Wasserdampf erzeugt, der einen hohen Druck — etwa 50 bar — und eine hohe Temperatur — etwa 270°C — hat. Mit dem Dampf wird eine Dampfturbine angetrieben. Am Ausgang der Turbine hat der Dampf nur noch einen Druck von etwa 70 Millibar, und eine Temperatur von 40 °C. Im Kondensator gibt der entspannte Dampf seine Entropie an das Wasser des Kühlkreislaufs ab. Das Kühlwasser bringt die Entropie dann konvektiv irgendwohin in die Umgebung: über einen weiteren Wärmeaustauscher in einen vorbeifließenden Fluss oder über einen Kühlturm in die Luft.

Die Kernreaktionen

Nun zu den Reaktionen, die im Kernreaktor ablaufen. Das Nuklid, das für die Energieproduktion zuständig ist, ist das Uranisotop ${}^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K}$. Im natürlichen Uran ist es nur zu 0,7 % enthalten. Die restlichen 99,3 % macht das Isotop ${}^{238}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K}$ aus. Zur Verwendung in Kernreaktoren wird das Uran zunächst auf einen ${}^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K}$-Gehalt von 3 % angereichert.

Der ${}^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K}$-Kern ist instabil und kann in zwei andere Nuklide zerfallen, z. B. so:

$${}^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba}_\mathrm{K} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr}_\mathrm{K} + 2\,\mathrm{n}$$

oder so:

$${}^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K} \rightarrow {}^{139}_{56}\mathrm{Ba}_\mathrm{K} + {}^{94}_{36}\mathrm{Kr}_\mathrm{K} + 2\,\mathrm{n}$$

oder so:

$${}^{235}_{92}\mathrm{U}_\mathrm{K} \rightarrow {}^{140}_{55}\mathrm{Cs}_\mathrm{K} + {}^{93}_{37}\mathrm{Rb}_\mathrm{K} + 2\,\mathrm{n}$$

oder auf sehr viele andere Arten.

Du siehst, dass bei der Reaktion außer den beiden größeren Nukliden noch zwei Neutronen entstehen. Wir werden gleich sehen, dass das wichtig ist.

Alle diese Zerfallsreaktionen haben zunächst einen hohen Reaktionswiderstand. Ihr Reaktionsumsatz ist so gering, dass sie eigentlich für die Energieproduktion völlig ungeeignet sind.

Die Reaktion kann nun aber leicht mit einem Katalysator beschleunigt werden. Und das Interessante daran ist: Als Katalysator sind Neutronen geeignet, d. h., gerade der Stoff, der bei der Reaktion selbst entsteht. Reaktionen, in denen der Katalysator, der die Reaktion beschleunigt, selbst produziert wird, nennt man autokatalytische Reaktionen. Um die Rolle des Katalysators zum Ausdruck zu bringen, können wir auf der linken Seite der Reaktionsgleichung ein Neutron hinzufügen. Auf der rechten Seite taucht dann natürlich auch ein Neutron mehr auf. So ergibt sich zum Beispiel:

$$^{235}_{92}\mathrm{U_K} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba_K} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr_K} + 3\,\mathrm{n}\,.$$

Das Uran reagiert mit einem Neutron, und es entstehen dabei drei Neutronen.

Dieser Zerfall in zwei größere Bruchstücke plus einige Neutronen ist aber nur der erste Reaktionsschritt. Denn nicht nur die entstandenen Neutronen reagieren weiter, sondern auch die großen Bruchstücke, die entstanden sind, sind durchweg instabil. Sie zerfallen in einer Kette von Folgereaktionen, bei denen sich aber von dem jeweiligen Kern immer nur kleine Teilchen lösen: Elektronen oder $^4_2$He-Kerne. Wir betrachten als Beispiel den beim Uranzerfall entstehenden $^{141}_{56}\mathrm{Ba_K}$-Kern:

$$^{141}_{56}\mathrm{Ba_K} \rightarrow {}^{141}_{57}\mathrm{La_K} + \mathrm{e} + \overline{\nu}$$
$$^{141}_{57}\mathrm{La_K} \rightarrow {}^{141}_{58}\mathrm{Ce_K} + \mathrm{e} + \overline{\nu}$$
$$^{141}_{58}\mathrm{Ce_K} \rightarrow {}^{141}_{59}\mathrm{Pr_K} + \mathrm{e} + \overline{\nu}\,.$$

Aus dem $^{141}_{56}\mathrm{Ba_K}$-Kern entsteht zunächst ein instabiler $^{141}_{57}\mathrm{La_K}$-Kern, daraus dann ein wiederum instabiler $^{141}_{58}\mathrm{Ce_K}$-Kern. Erst der daraus entstehende $^{141}_{59}\mathrm{Pr_K}$-Kern ist stabil.

Alle aufgeführten Reaktionen tragen zur Energieproduktion des Reaktors bei, wenn auch in sehr unterschiedlichem Ausmaß. Etwa 95 % der insgesamt abgegebenen Energie entstehen bei dem durch Neutronen katalysierten Zerfall des Urans und nur 5 % bei den Folgereaktionen.

Trotz der geringen Bedeutung für die Energiebilanz des Reaktors spielen die Folgereaktionen im Reaktorbetrieb eine sehr wichtige Rolle: Sie sind der Grund dafür, dass ein Reaktor sehr kostspielige Sicherheitsvorrichtungen braucht.

> Im Kernreaktor zerfallen $^{235}_{92}$U-Kerne in zwei etwa gleich große Kerne sowie einige Neutronen. Die Reaktion wird von Neutronen katalysiert (Autokatalyse). Alle entstehenden Nuklide sind instabil und zerfallen weiter.

Die Steuerung des Reaktors

Zunächst zur Erinnerung, wie man den Heizkessel eines Kohlekraftwerks steuert: genauso wie eine Ölheizung, wie einen gewöhnlichen Kohleofen oder wie ein Kaminfeuer. Damit die Reaktion schneller läuft, führt man mehr Brennmaterial und mehr Sauerstoff zu. Um die Umsatzrate zu vermindern, drosselt man die Brennstoff- oder Luftzufuhr.

Da im Kernreaktor eine autokatalytische Reaktion abläuft, kann man hier anders verfahren: Der Reaktor wird einmal im Jahr mit dem „Brennstoff“ geladen, d. h. mit dem Uranbedarf für das ganze Jahr. Die Umsatzrate lässt sich nun ganz einfach dadurch regeln, dass man die Menge des Katalysators – der Neutronen – beeinflusst. Man vermindert die Neutronenkonzentration im Reaktor, indem man Steuerstäbe in die Reaktionszone hineinschiebt. Die Steuerstäbe sind Stäbe aus einem Material, das Neutronen absorbiert, d. h. mit dem die Neutronen besonders gut reagieren.

Die Sicherheitsvorrichtungen

Bei der katalytischen Zerlegung des Urans entstehen sehr, sehr viele verschiedene Nuklide, und alle sind instabil, sie reagieren weiter. Die Folgereaktionen werden aber nicht durch irgendeinen Katalysator beschleunigt. Sie laufen mit den verschiedensten ihnen eigenen Geschwindigkeiten: einige sehr schnell, andere sehr langsam.

Wir hatten gesehen, dass bei diesen Folgereaktionen neben einem schwereren Nuklid immer ein leichtes Teilchen entsteht: ein Elektron oder ein $^{4}_{2}$He-Kern. Wir wissen schon, dass in diesem Fall fast die ganze Energie, die bei der Reaktion übrig ist, von dem leichten Teilchen mitgenommen wird. Das bedeutet, dass die Zerfallsprodukte des Urans radioaktiv sind. Wegen der hohen Umsatzraten im Reaktor ist die Kernstrahlung, die die Zerfallsprodukte emittieren, sehr intensiv und gefährlich.

Daraus ergibt sich eines der Probleme beim Betrieb eines Reaktors. Die Zerfallsprodukte des Urans dürfen nicht in die Umgebung gelangen. Dies zu verhindern ist schon schwierig genug. Es gibt aber noch ein anderes Problem: Man kann die Energieproduktion eines Reaktors nicht schnell stoppen. Man kann zwar, mithilfe der Steuerstäbe, die Uranzerfallsreaktion sehr schnell anhalten. Auf die Folgereaktionen hat man aber keinen Einfluss. Die Folgereaktionen laufen weiter und klingen erst nach und nach ab. Tab. 32.5 zeigt, wie die Energieproduktion nach dem Anhalten der Uranspaltung noch weiterläuft.

Zeit nach dem Abschalten	**Energieproduktion** (bezogen auf den Normalbetrieb)
5 Sekunden	5 %
1 Minute	4 %
10 Minuten	3 %
1 Stunde	1 %
1 Tag	0,7 %
2 Tage	0,5 %

Tab. 32.5

Ein großes Kraftwerk produziert im Normalbetrieb etwa 1000 MW. Schaltet man es ab, so produziert es nach einem Tag noch 0,7 % von 1000 MW. Das sind 7 MW. Die Energieabfuhr muss daher noch für einige Tage nach dem Abschalten gewährleistet sein. Andernfalls könnte sich der Reaktor so stark erhitzen, dass der Reaktorbehälter schmilzt.

Die Sicherheitssysteme von Kernkraftwerken müssen nun so beschaffen sein, dass auch im Notfall der Abtransport der Wärme gewährleistet ist, sodass ein Schmelzen des Reaktorbehälters sehr unwahrscheinlich wird. Sollte dies doch geschehen, müssen weitere Sicherheitsbarrieren dafür sorgen, dass keine radioaktiven Stoffe in die Umgebung gelangen.

> Ein Reaktor braucht wegen der Folgereaktionen der Zerfallsprodukte des Urans sehr aufwendige Sicherheitssysteme, denn
> - die Zerfallsprodukte des Urans sind radioaktiv und dürfen nicht in die Umgebung gelangen;
> - die Energieproduktion bei den Folgereaktionen kann man nicht abschalten.

Die radioaktiven Abfälle

Wenn der Reaktor einmal im Jahr mit neuem Uran geladen wird, müssen vorher die Reaktionsprodukte des abgelaufenen Jahres aus dem Reaktor entfernt werden. Bei diesen Reaktionsprodukten handelt es sich um ein Gemisch aus den verschiedensten Nukliden. Viele dieser Nuklide sind instabil, und man trifft Nuklide mit den verschiedensten Halbwertszeiten an.

Mit dem Entladen der Reaktionsprodukte kann man natürlich nicht so lange warten, bis sich alle instabilen Nuklide in stabile verwandelt haben, denn einige Nuklide haben Halbwertszeiten von Jahren, andere von Jahrzehnten und wieder andere sogar von Jahrhunderten und Jahrtausenden.

Die Reaktionsprodukte, die man einmal im Jahr aus dem Reaktor entnimmt, sind also noch radioaktiv, und sie bleiben es noch für eine lange Zeit. Sie müssen daher an einem Ort gelagert werden, von dem aus sie nicht in den biologischen Stoffkreislauf gelangen können.

Plutonium

Die Zerfälle des Urans und der Folgeprodukte sind die wichtigsten und häufigsten Reaktionen im Kernreaktor. Daneben finden aber noch Reaktionen eines anderen Typs statt: Synthesereaktionen.

Das $^{238}_{92}\mathrm{U_K}$ reagiert mit Neutronen zu schwereren Nukliden. Unter diesen ist das Plutonium besonders wichtig. Plutonium ist ein Element, von dem kein Isotop in der Natur vorkommt. Im Reaktor entsteht das $^{239}_{94}$Pu-Nuklid aus $^{238}_{92}\mathrm{U_K}$ in der folgenden Reaktion

$$^{238}_{92}U_K + n \rightarrow {}^{239}_{94}Pu_K + 2\,e + 2\,\overline{\nu}.$$

In den radioaktiven Abfällen ist also auch Plutonium enthalten. Auch $^{239}_{94}Pu_K$ ist radioaktiv. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von 24 000 Jahren unter Abgabe von Heliumkernen.

Wie $^{238}_{92}U_K$, so wird auch der Zerfall von $^{239}_{94}Pu_K$ in zwei etwa gleich große Teile durch Neutronen katalysiert. Man könnte daher $^{239}_{94}Pu_K$ als Reaktorbrennstoff verwenden. Man müsste es dazu zunächst von den anderen radioaktiven Abfallstoffen abtrennen. Damit ist aber ein neues Problem verbunden. Mit solchem abgetrennten, reinen Plutonium lässt sich auf relativ bequeme Art eine Atombombe bauen.

Aufgaben

1. Vergleiche die Energieproduktion der Uranzerfallsreaktion

$$^{235}_{92}U_K + n \rightarrow {}^{141}_{56}Ba_K + {}^{92}_{36}Kr_K + 3\,n$$

mit der Energieproduktion der Folgereaktion

$$^{141}_{56}Ba_K \rightarrow {}^{141}_{57}La_K + e + \overline{\nu}.$$

2. Wir betrachten die Folgereaktionen, bei denen aus $^{141}_{56}Ba$ zunächst $^{141}_{57}La$, dann $^{141}_{58}Ce$ und schließlich $^{141}_{59}Pr_K$ entsteht:

$$^{141}_{56}Ba_K \rightarrow {}^{141}_{57}La_K + e + \overline{\nu}.$$
$$^{141}_{57}La_K \rightarrow {}^{141}_{58}Ce_K + e + \overline{\nu}.$$
$$^{141}_{58}Ce_K \rightarrow {}^{141}_{59}Pr_K + e + \overline{\nu}.$$

Die Halbwertszeiten der drei instabilen Nuklide sind:

$T_{1/2}(^{141}_{56}Ba)$ = 18 Minuten

$T_{1/2}(^{141}_{57}La)$ = 4 Stunden

$T_{1/2}(^{141}_{58}Ce)$ = 32 Tage

Wir beginnen zum Zeitpunkt t_0 mit einer bestimmten Menge $^{141}_{56}Ba$. Schätze ganz grob ab, wie viel Ba, La, Ce, und Pr vorhanden ist („viel“, „mittel“, „wenig“, „sehr wenig“):
a) nach 30 Sekunden,
b) nach 18 Minuten,
c) nach 5 Tagen,
d) nach 1 Jahr.

33 ANHANG

33.1 Tabelle der chemischen Potenziale und der molaren Entropien

Die Werte der folgenden Tab. 33.1 gelten für Stoffe unter Normalbedingungen, d. h. für eine Temperatur von 25 °C und einen Druck von 1 bar. Bei gelösten Stoffen beziehen sich die Werte auf einmolare Lösungen: 1 Liter der Lösung enthält 1 mol des gelösten Stoffes.

Für einige gelöste Stoffe sind die in der Tabelle aufgeführten molaren Entropien negativ. So findet man z. B. für Ca^{2+}: $S/n = -55{,}23$ Ct/mol. Tatsächlich gibt es natürlich keine negativen Entropien. Diese Angabe ist nur die Folge eines Rechentricks. Ionen sind in wässriger Lösung von sogenannten Hydrathüllen umgeben: An jedes Ion lagert sich eine gewisse Zahl Wassermoleküle an. Ion und Hydrathülle bilden zusammen eine Art großes Molekül. Beim Lösen, etwa von $CaCl_2$, findet also die Reaktion

$$\begin{aligned}&CaCl_2 + n\,H_2O(\text{normal}) + 2\,m\,H_2O(\text{normal})\\ &\to Ca^{2+} + 2\,Cl^- + n\,H_2O(Ca^{2+}\text{ Hydrathülle}) +\\ &\qquad 2\,m\,H_2O(Cl^-\text{ Hydrathülle})\end{aligned}$$

statt. $CaCl_2$ verwandelt sich in Ca^{2+}- und Cl^--Ionen, und es geht „normales“ Wasser in Wasser von Hydrathüllen über. Nun schreibt man diese Reaktion aber gewöhnlich einfach so:

$$CaCl_2 \to Ca^{2+} + 2\,Cl^-$$

d. h., man lässt das Wasser auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung weg. Damit die Entropiebilanz trotzdem stimmt, schlägt man die Entropie, die bei der Bildung der Hydrathülle abgegeben wird, einfach der Entropie der Ionen zu. In der Tabelle steht also unter Ca^{2+} die molare Entropie von

$$\begin{aligned}&Ca^{2+} + n\,[H_2O\,(Ca^{2+}\text{ Hydrathülle})\\ &- H_2O(\text{normal})]\end{aligned}$$

und unter Cl^- steht die molare Entropie von

$$\begin{aligned}&Cl^- + m\,[H_2O\,(Cl^-\text{-Hydrathülle})\\ &- H_2O\,(\text{normal})]\end{aligned}$$

Nimmt man diese Werte, so kann man die vereinfachte Reaktionsgleichung benutzen, um die Entropiebilanz der Reaktion aufzustellen.

Da die molare Entropie von normalem Wasser viel größer ist, als die von Wasser einer Hydrathülle, kann es passieren, dass die gesamte bei einem Ion aufgeführte molare Entropie negativ ist.

Tabelle der chemischen Potenziale und der molaren Entropien

Tab. 33.1 Ag ... B (Silber bis Bor)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Ag	Silber, gasförmig	245,68	172,89
Ag	fest	0,00	42,55
Ag^+	wässrige Lösung	77,12	72,68
$AgBr$	fest	-96,90	107,11
$AgCl$	fest	-109,80	96,23
AgI	fest	-66,19	115,48
$AgNO_2$	fest	19,08	128,20
$AgNO_3$	fest	-33,47	140,92
AgN_3	fest	376,14	104,18
Ag_2CO_3	fest	-436,81	167,36
Ag_2O	fest	-11,21	121,34
Ag_2O_2	fest	27,61	117,15
Ag_2O_3	fest	121,34	100,42
Ag_2S	orthorhombisch, fest	-40,67	144,01
Ag_2SO_4	fest	-618,48	200,41
Al	Aluminum, gasförmig	285,77	164,45
Al	flüssig	6,61	35,23
Al	fest	0,00	28,32
Al^{3+}	wässrige Lösung	-485,34	-321,75
$AlBr_3$	fest	-505,01	184,1
$Al(CH_3)_3$	flüssig	-10,04	209,41
$AlCl_3$	gasförmig	-570,05	314,29
$AlCl_3$	fest	-630,06	109,29
AlF_3	gasförmig	-1192,75	276,77
AlF_3	fest	-1431,15	66,48
AlI_3	fest	-300,83	158,99
AlN	fest	-287,02	20,17
$Al(NO_3)_3 \cdot 6\,H_2O$	fest	-2203,88	467,77
$AlO(OH)$	Böhmit, fest	-912,95	48,45
$AlO(OH)$	α-Diaspor, fest	-920,48	35,27
$Al(OH)_3$	Hydrargillit, fest	-1143,91	70,12
$AlPO_4$	Berlinit, fest	-1601,22	90,79
Al_2Cl_6	gasförmig	-1220,47	489,53
Al_2O_3	flüssig	-1483,14	99,28
Al_2O_3	α, fest	-1581,88	50,94
Al_2O_3	γ, fest	-1563,94	52,51
$Al_2(SO_4)_3$	fest	-3100,13	239,32
$Al_2(SO4)_3 \cdot 6\,H_2O$	fest	-4622,57	469,03
Al_2SiO_5	Andalusit, fest	-2597,43	93,22
Al_2SiO_5	Cyanit, fest	-2596,17	83,81
$Al_2SiO_5 \cdot 2\,H_2O$	Sillimanit, fest	-2625,88	96,19
$Al_2Si_2O_7 \cdot 2\,H_2O$	Halloysit, fest	-3759,32	203,34
$Al_2Si_2O_7 \cdot 2\,H_2O$	Kaolinit, fest	-3778,15	202,92

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Al_4C_3	fest	-196,23	88,95
$Al_6Si_2O_{13}$	Mullit, fest	-6441,94	274,89
Ar	Argon, gasförmig	0,00	154,73
Ar	wässrige Lösung	16,32	59,41
As	Arsen, gasförmig	261,08	174,10
As	grau, metall., fest	0,00	35,15
$AsCl_3$	gasförmig	-248,95	327,06
$AsCl_3$	flüssig	-259,41	216,31
AsF_3	flüssig	-909,14	181,21
AsI_3	fest	-59,41	213,05
As_2O_3	monoklin, fest	-577,02	117,15
As_2O_5	fest	-782,41	105,44
As_2S_3	fest	-168,62	163,59
As_4O_6	cubisch, fest	-1152,52	214,22
Au	Gold, gasförmig	326,36	180,39
Au	fest	0,00	47,40
Au_2O_3	fest	163,30	125,00
B	Bor, gasförmig	511,67	153,34
B	flüssig	19,35	14,78
B	fest	0,00	5,87
BBr_3	gasförmig	-232,46	324,13
BBr_3	flüssig	-238,49	229,70
$B(CH_3)_3$	gasförmig	-35,98	314,64
BCl_3	gasförmig	-387,98	290,07
BCl_3	flüssig	-387,44	206,27
BF_3	gasförmig	-1120,35	254,01
BN	fest	-228,45	14,81
BO_2H	monoklin, fest	-723,41	37,66
BO_2H	orthorhombisch, fest	-721,74	50,21
BO_3H_3	gasförmig	-928,43	295,14
BO_3H_3	fest	-969,01	88,83
B_2Cl_4	gasförmig	-460,66	357,31
B_2Cl_4	flüssig	-464,84	262,34
B_2F_4	gasförmig	-1410,43	317,15
B_2O_3	gasförmig	-822,58	283,67
B_2O_3	flüssig	-1180,37	78,40
B_2O_3	fest	-1193,70	53,97
B_2O_3	amorph	-1182,40	77,82
$B_3N_6H_6$	flüssig	-392,79	199,58
B_4C	fest	-71,13	27,11

Ba ... C (Barium bis Kohlenstoff)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Ba	Barium, gasförmig	144,77	170,28
Ba	fest	0,00	66,94
Ba^{2+}	wässrige Lösung	-560,66	12,55
$BaCO_3$	Witherit, fest	-1138,88	112,13
$BaCl_2$	fest	-810,86	125,52
BaF_2	fest	-1148,51	96,23
BaI_2	fest	-598,00	167,4
$Ba(NO_3)_2$	fest	-794,96	213,8
BaO	fest	-528,44	70,29
$Ba(OH)_2 \cdot 8\,H_2O$	fest	-2793,24	426,77
BaS	fest	-456,06	78,24
$BaSO_4$	fest	-1353,11	132,21
Be	Beryllium, gasförmig	289,66	136,17
Be	flüssig	9,96	16,54
Be	fest	0,00	9,54
$BeCl_2$	gasförmig	-366,10	251,04
$BeCl_2$	α, fest	-446,26	82,68
BeF_2	gasförmig	-800,54	227,44
BeF_2	fest	-979,38	53,35
$Be(OH)_2$	gasförmig	-625,37	247,69
$Be(OH)_2$	α, fest	-814,51	49,37
Bi	Wismut, gasförmig	168,20	186,9
Bi	fest	0,00	56,74
BiClO	fest	-322,17	120,50
$BiCl_3$	fest	-315,06	176,98
Bi_2O_3	fest	-493,71	151,46
Bi_2S_3	fest	-140,58	200,41
Br	Brom, gasförmig	82,43	174,91
Br^-	wässrige Lösung	-103,97	82,42
BrCl	gasförmig	-0,96	239,99
BrF	gasförmig	-109,16	228,86
BrF_3	gasförmig	-229,45	292,42
BrF_3	flüssig	-240,58	178,24
BrF_5	gasförmig	-350,62	320,08
BrF_5	flüssig	-351,87	225,10
BrH	gasförmig	-53,43	198,59
Br_2	gasförmig	3,14	245,35
Br_2	flüssig	0,00	152,23
C	Kohlenstoff, gasförmig	669,58	157,99
C	Diamant, fest	2,90	2,38

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
C	Graphit, fest	0,00	5,74
CBr_4	gasförmig	66,94	357,94
CBr_4	monoklin, fest	47,70	212,55
CCl_2O	Carbonylchlorid, gasf.	-204,6	283,42
CCl_4	gasförmig	-60,63	309,74
CCl_4	flüssig	-65,27	216,40
CF_4	gasförmig	-878,64	261,50
CH	gasförmig	560,75	182,92
$CHCl_3$	Chloroform, gasförmig	-70,41	295,51
CH_2	gasförmig	371,87	181,04
CH_2	Polyethylen, fest	4,40	25,34
CH_2Cl_2	Dichlormethan, gasf.	-68,97	270,18
CH_2O	Formaldehyd, gasf.	-112,97	218,66
CH_2O_2	Ameisensäure, gasf.	-350,03	251,6
CH_2O_2	Ameisensäure, flüssig	-359,57	129,00
CH_2O_2	Ameisensäure, w. L.	-372,38	163,18
CH_3	gasförmig	147,92	194,05
CH_3Br	Brommethan, gasf.	-25,94	246,27
CH_3Cl	Chlormethan, gasf.	-62,95	234,26
CH_3NO_2	Nitromethan, gasf.	-6,92	275,00
CH_3NO_2	Nitromethan., flüssig	-14,55	171,90
CH_3NO_3	Methylnitrat., flüssig	-40,52	217,00
CH_4	Methan, gasförmig	-50,81	186,10
CH_4N_2O	Harnstoff, fest	-196,82	104,60
CH_4O	Methanol, gasförmig	-162,52	239,70
CH_4O	Methanol, flüssig	-166,34	126,70
CO	gasförmig	-137,15	197,56
CO_2	gasförmig	-394,36	213,64
CO_2	wässrige Lösung	-386,00	113,00
CO_3^{2-}	Carbonat-Ion, w. L.	-527,90	-56,90
CO_3H^-	wässrige Lösung	-586,85	91,21
CS	gasförmig	184,10	210,46
CS_2	gasförmig	66,91	237,79
CS_2	flüssig	65,27	151,34
C_2Cl_2	Dichlorethin, gasförmig	198,41	271,96
C_2Cl_4	Tetrachlorethen, gasf.	21,56	343,31
C_2Cl_6	Hexachlorethan, gasf.	-50,00	397,77
C_2H_2	Ethin, gasförmig	209,20	200,83
C_2H_4	Ethen, gasförmig	68,12	219,45
C_2H_4O	Acetaldehyd, gasförmig	-132,92	264,20
C_2H_4O	Epoxyethan, gasförmig	-11,84	243,70
$C_2H_4O_2$	Essigsäure, gasförmig	-378,95	282,50
$C_2H_4O_2$	Essigsäure, flüssig	-389,95	159,83
$C_2H_4O_2$	Essigsäure, w. L.	-396,56	178,66

Tabelle der chemischen Potenziale und der molaren Entropien

C ... Cl (Kohlenstoff bis Chlor)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
C_2H_5Cl	Ethylchlorid, gasförmig	-60,46	275,89
C_2H_5Cl	Ethylchlorid, flüssig	-59,41	190,79
$C_2H_5O_2N$	Aminoessigsäure, fest	-367,02	109,20
C_2H_6	Ethan, gasförmig	-32,62	229,50
C_2H_6O	Dimethylether, gasf.	-114,07	266,60
C_2H_6O	Ethanol, gasförmig	-168,57	282,00
C_2H_6O	Ethanol, flüssig	-174,89	160,67
$C_2H_6O_2$	Ethandiol, Glycol, f.	-327,07	179,50
C_3H_4	Propadien, gasförmig	202,38	234,90
C_3H_4	Propin, gasförmig	194,16	248,10
C_3H_6	Propen, gasförmig	74,66	226,90
C_3H_6	Cyclopropan, gasförmig	104,11	237,90
C_3H_6O	Propanon, Aceton, gasf.	-151,82	294,90
C_3H_6O	Propanon, Aceton, f.	-154,83	200,00
C_3H_8	Propan, gasförmig	-23,43	269,90
C_4H_8	Buten-(1), gasförmig	72,03	307,40
$C_4H_8O_2$	Essigsäure-Ethylester, f.	-323,19	259,00
C_4H_{10}	Butan, gasförmig	-15,62	310,00
C_4H_{10}	2-Methylpropan, gasf.	-17,92	294,60
C_5H_{10}	Cyclopentan, gasförmig	38,67	292,90
C_5H_{10}	Cyclopentan, flüssig	36,49	204,10
C_5H_{12}	Pentan, gasförmig	-8,11	348,40
C_5H_{12}	Pentan, flüssig	-9,21	262,70
C_6H_5Cl	Chlorbenzol, flüssig	93,65	194,10
$C_6H_5NO_2$	Nitrobenzol, flüssig	141,62	224,30
C_6H_6	Benzol, gasförmig	129,73	269,20
C_6H_{12}	Cyclohexan, gasförmig	31,75	298,20
C_6H_{12}	Cyclohexan, flüssig	26,83	204,10
C_6H_{14}	Hexan, gasförmig	0,30	386,80
C_6H_{14}	Hexan, flüssig	-4,26	296,00
C_7H_8	Methylbenzol, Toluol, gasf.	122,39	319,70
C_7H_8	Methylbenzol, Toluol, fl..	110,61	219,00
C_8H_{18}	Octan, gasförmig	17,44	463,70
C_8H_{18}	Octan, flüssig	6,41	361,20
$C_{12}H_{22}O_{11}$	Saccharose, fest	-1543,52	360,00

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Ca	Calcium, gasförmig	145,53	154,78
Ca	flüssig	8,19	50,65
Ca	α, fest	0,00	41,55
Ca	β, fest	0,22	42,47
Ca^{2+}	wässrige Lösung	-553,04	-55,23
$CaBr_2$	fest	-656,05	129,70
$CaCO_3$	Aragonit, fest	-1127,71	88,70
$CaCO_3$	Calcit, fest	-1128,76	92,88
CaC_2	fest	-67,78	70,29
$CaCl$	gasförmig	-130,96	241,42
$CaCl_2$	gasförmig	-479,18	289,95
$CaCl_2$	flüssig	-732,16	123,88
$CaCl_2$	fest	-750,19	113,8
$CaCrO_4$	fest	-1277,38	133,89
CaF_2	gasförmig	-793,27	273,68
CaF_2	fest	-1161,90	68,87
CaH_2	fest	-149,79	41,84
CaI_2	fest	-529,69	142,26
$Ca(NO_3)_2$	fest	-741,99	193,3
CaO	fest	-604,17	39,75
$Ca(OH)_2$	fest	-896,76	76,15
$CaPO_4H$	fest	-1679,88	87,86
CaS	fest	-477,39	56,48
$CaSO_4$	Anhydrit, fest	-1320,30	98,32
$CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$	Gips, fest	-1795,73	193,97
$CaSiO_3$	α-Wollastonit, fest	-1495,36	87,45
$CaSiO_3$	β-Wollastonit, fest	-1498,71	82,01
Ca_3N_2	fest	-368,61	104,60
$Ca_3(PO_4)_2$	α, fest	-3889,86	241,00
$Ca_3(PO_4)_2$	β, fest	-3899,49	235,98

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Cd	Cadmium, gasförmig	77,45	167,64
Cd	fest	0,00	51,76
Cd^{2+}	wässrige Lösung	-77,58	-73,22
$CdBr_2$	fest	-296,31	137,24
$CdCO_3$	fest	-669,44	92,47
$CdCl_2$	fest	-343,97	115,27
CdF_2	fest	-647,68	77,40
CdI_2	fest	-201,38	161,08
CdO	fest	-228,45	54,81
CdS	fest	-156,48	64,85
$CdSO_4$	fest	-822,78	123,04
$CdSO_4 \cdot 8/3\,H_2O$	fest	-1457,98	229,70

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Cl	Chlor, gasförmig	105,03	165,10
Cl^-	wässrige Lösung	-131,26	56,48
ClF	gasförmig	-55,94	217,78
ClF_3	gasförmig	-123,01	281,50
ClF_5	gasförmig	-146,77	310,62
ClH	gasförmig	-95,30	186,79
ClO_2	gasförmig	120,50	256,73
Cl_2	gasförmig	0,00	222,97

Cl ... Fe (Chlor bis Eisen)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Cl_2	wässrige Lösung	6,9	121,34
Co	Kobalt, gasförmig	380,33	179,41
Co	α, hexagonal, fest	0,00	30,04
Co	β, fcc, fest	0,25	30,71
Co^{2+}	wässrige Lösung	-54,39	-112,97
Co^{3+}	wässrige Lösung	133,89	-305,43
$CoCl_2$	fest	-269,87	109,16
CoF_2	fest	-647,26	81,96
$CoFe_2O_4$	fest	-1032,61	134,72
CoO	fest	-214,22	52,97
$CoSO_4$	fest	-782,41	117,99
Co_3O_4	fest	-774,04	102,51
Cr	Chrom, gasförmig	351,87	174,39
Cr	fest	0,00	23,77
$CrCl_2$	fest	-356,06	115,31
$CrCl_2O_2$	Chromylchlorid, fl.	-510,87	221,75
$CrCl_3$	fest	-486,18	123,01
CrF_3	fest	-1087,84	93,89
Cr_2O_3	fest	-1058,13	81,17
Cs	Cäsium, gasförmig	49,72	175,49
Cs	flüssig	0,03	92,07
Cs	fest	0,00	85,15
Cs^+	wässrige Lösung	-282,04	133,05
CsBr	fest	-383,25	121,34
CsCl	gasförmig	-257,85	255,96
CsCl	fest	-414,37	101,18
$CsClO_4$	fest	-306,60	175,27
CsF	gasförmig	-373,35	243,09
CsF	fest	-525,39	88,28
CsH	gasförmig	101,67	214,43
CsI	fest	-333,46	129,7
Cu	Kupfer, gasförmig	298,61	166,27
Cu	flüssig	8,37	36,25
Cu	fest	0,00	33,11
Cu^+	wässrige Lösung	50,00	40,58
CuBr	fest	-100,83	96,11
$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	Malachit, fest	-893,7	186,19
CuCl	gasförmig	63,50	237,09
CuCl	fest	-119,87	86,19
$CuCl_2$	fest	-175,73	108,07

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
CuI	fest	-69,45	96,65
CuN_3	fest	344,76	100,42
CuO	gasförmig	216,93	234,6
CuO	fest	-129,7	42,63
$Cu(OH)_2$	fest	-372,74	108,37
CuS	fest	-53,56	66,53
$CuSO_4$	fest	-661,91	108,78
$CuSO_4 \cdot H_2O$	fest	-918,22	146,02
$CuSO_4 \cdot 3\,H_2O$	fest	-1400,18	221,33
$CuSO_4 \cdot 5\,H_2O$	fest	-1880,06	300,41
Cu_2O	fest	-146,02	93,14
Cu_2S	α, fest	-86,19	120,92
F	Fluor, gasförmig	61,92	158,64
F^-	wässrige Lösung	-278,82	-13,81
FH	gasförmig	-273,22	173,67
FH	wässrige Lösung	-296,85	88,70
F_2	gasförmig	0,00	202,67
F_2O	gasförmig	-4,60	247,32
Fe	Eisen, gasförmig	370,70	180,38
Fe	flüssig	11,05	34,29
Fe	α, fest	0,00	27,28
Fe^{2+}	wässrige Lösung	-78,87	-137,65
Fe^{3+}	wässrige Lösung	-4,60	-315,89
$FeCO_3$	Siderit, fest	-666,72	92,88
$Fe(CO)_5$	flüssig	-705,42	338,07
$FeCl_2$	gasförmig	-159,62	287,48
$FeCl_2$	fest	-302,34	117,95
$FeCl_3$	gasförmig	-247,87	344,10
$FeCl_3$	fest	-334,05	142,26
$FeCr_2O_4$	fest	-1343,9	146,02
FeO	gasförmig	217,66	241,84
FeO	fest	-245,14	57,49
$Fe(OH)_2$	gasförmig	-306,63	282,75
$Fe(OH)_2$	fest	-492,03	87,86
$Fe(OH)_3$	fest	-705,56	104,60
FeS	Pyrrhotin, fest	-100,42	60,29
$FeSO_4$	fest	-820,90	107,53
FeS_2	Pyrit, fest	-166,94	52,93
Fe_2O_3	Hematit, fest	-742,24	87,40
$Fe_2(SO4)_3$	fest	-2263,05	307,52
Fe_2SiO_4	Fayalit, fest	-1379,05	145,18
Fe_3C	Cementit, fest	20,08	104,60

Fe … K (Eisen bis Kalium)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Fe_3O_4	Magnetit, fest	-1015,46	146,44
Ga	Gallium, gasförmig	238,91	168,95
Ga	fest	0,00	40,88
Ga^{3+}	wässrige Lösung	-158,99	-330,54
$GaBr_3$	fest	-359,82	179,91
$GaCl_3$	fest	-454,80	142,26
GaF_3	fest	-1085,33	83,68
$Ga(OH)_3$	fest	-831,36	100,42
Ga_2O_3	rhomboedrisch, fest	-998,30	84,98
Ge	Germanium, gasförmig	335,98	167,79
Ge	fest	0,00	31,09
$GeBr_4$	flüssig	-331,37	280,75
$GeCl_4$	gasförmig	-457,31	347,61
$GeCl_4$	flüssig	-462,33	245,6
GeH_4	gasförmig	113,39	217,02
GeI_4	fest	-144,35	271,12
GeO	braun, fest	-237,23	50,21
GeO_2	hexagonal, fest	-497,06	55,27
GeS	fest	-71,55	71,13
H	Wasserstoff, gasförmig	203,26	114,60
H^+	wässrige Lösung	0,00	0,00
HCO_3^-	siehe unter $CO_3H_2^-$		
HCl	siehe unter ClH		
H_2	gasförmig	0,00	130,57
H_2	wässrige Lösung	18,00	49,00
H_2CO_3	siehe unter CO_3H_2		
H_2O	siehe unter OH_2		
…	…		
He	Helium, gasförmig	0,00	126,04
He	wässrige Lösung	19,25	55,65
Hg	Quecksilber, gasförmig	31,85	174,85
Hg	flüssig	0,00	76,02
Hg^{2+}	wässrige Lösung	164,43	-32,22
$HgBr_2$	fest	-153,13	171,54
$HgCl_2$	fest	-178,66	146,02
HgI_2	rot, fest	-101,67	179,91

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
HgO	rot, fest	-58,56	70,29
HgO	gelb, fest	-58,43	71,13
HgS	rot, fest	-50,63	82,42
HgS	schwarz, fest	-47,70	88,28
Hg_2^{2+}	wässrige Lösung	153,55	84,52
Hg_2Br_2	fest	-181,08	217,57
Hg_2CO_3	fest	-468,19	179,91
Hg_2Cl_2	fest	-210,78	192,46
Hg_2I_2	fest	-111,00	233,47
Hg_2SO_4	fest	-625,88	200,66
Hf	Hafnium, gasförmig	576,56	186,78
Hf	fest	0,00	43,56
$HfCl_4$	fest	-901,32	190,79
HfF_4	monoklin, fest	-1830,5	112,97
HfO_2	fest	-1027,17	59,33
I	Iod, gasförmig	70,28	180,68
I^-	wässrige Lösung	-51,59	111,29
ICl	gasförmig	-5,44	247,44
ICl_3	fest	-22,34	167,36
IF	gasförmig	-118,49	236,06
IF_7	gasförmig	-818,39	346,44
IH	gasförmig	1,72	206,48
I_2	gasförmig	19,36	260,58
I_2	flüssig	3,32	150,36
I_2	fest	0,00	116,14
I_2	wässrige Lösung	16,40	137,24
In	Indium, gasförmig	208,74	173,68
In	fest	0,00	57,82
In^{3+}	wässrige Lösung	-106,27	150,62
InBr	fest	-169,03	112,97
InI	fest	-120,50	129,7
$In(OH)_3$	fest	-761,49	104,6
In_2O_3	fest	-830,73	104,18
$In_2(SO_4)_3$	fest	-2439,27	271,96
Ir	Iridium, gasförmig	617,98	193,47
Ir	fest	0,00	35,48
IrF_6	fest	-461,66	247,69
K	Kalium, gasförmig	61,17	160,23
K	flüssig	0,26	71,45

K ... Mn (Kalium bis Mangan)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
K	fest	0.00	55.81
K^+	wässrige Lösung	-283.26	102.51
$KAl(SO_4)_2$	fest	-2235.47	204.60
KBF_4	fest	-1785.00	133.89
KBr	fest	-379.20	96.44
$KBrO_3$	fest	-243.51	149.16
KCl	gasförmig	-233.41	238.99
KCL	flüssig	-395.11	86.65
KCl	fest	-408.32	82.68
$KClO_3$	fest	-289.91	142.97
$KClO_4$	fest	-304.18	151.04
KF	gasförmig	-344.80	226.50
KF	fest	-533.13	66.57
KF_2H	fest	-852.41	104.27
KI	gasförmig	-165.90	258.17
KI	fest	-322.29	104.35
KIO_3	fest	-425.51	151.46
KH	fest	-34.04	50.21
$KMnO_4$	fest	-713.79	171.71
KNO_2	fest	-306.6	152.09
KNO_3	fest	-393.13	132.93
KOH	gasförmig	-235.46	244.35
KOH	flüssig	-317.87	98.40
KOH	fest	-379.05	79.29
KSO_4H	fest	-1031.36	138.07
K_2CO_3	flüssig	-1049.44	170.37
K_2CO_3	fest	-1064.59	155.52
K_2O	fest	-322.11	94.14
K_2O_2	fest	-429.79	112.97
K_2CrO_4	fest	-1295.78	200.12
K_2PtCl_6	fest	-1109.18	333.88
K_2SO_4	fest	-1316.37	175.73
Kr	Krypton, gasförmig	0.00	163.97
Kr	wässrige Lösung	15.06	61.50
La	Lanthan, gasförmig	330.54	182.30
La	fest	0.00	57.32
La^{3+}	wässrige Lösung	-723.41	-184.1
Li	Lithium, gasförmig	128.04	138.67
Li	flüssig	0.93	33.94
Li	fest	0.00	29.10
Li^+	wässrige Lösung	-293.80	14.23

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
LiCl	gasförmig	-217.26	212.81
LiCl	fest	-384.03	59.30
LiF	gasförmig	-361.57	200.16
LiF	fest	-588.67	35.66
LiH	gasförmig	117.84	170.80
LiH	fest	-68.46	20.04
LiI	gasförmig	-134.22	232.12
LiI	fest	-269.66	85.77
LiOH	gasförmig	-252.42	217.57
LiOH	fest	-438.73	42.78
Li_2CO_3	fest	-1132.44	90.37
Li_2CO_3	flüssig	-1105.55	127.29
Li_2O	gasförmig	-187.31	229.00
Li_2O	fest	-562.11	37.89
Mg	Magnesium, gasförmig	113.07	148.55
Mg	flüssig	6.10	42.51
Mg	fest	0.00	32.69
Mg^{2+}	wässrige Lösung	-456.01	-117.99
$MgCO_3$	fest	-1029.26	65.69
$MgCl_2$	gasförmig	-398.80	276.91
$MgCl_2$	flüssig	-563.96	129.49
$MgCl_2$	fest	-592.12	89.63
MgF_2	gasförmig	-731.50	258.30
MgF_2	fest	-1071.12	57.24
MgI_2	fest	-358.15	129.70
$Mg(NO_3)_2$	fest	-588.40	164.01
MgO	gasförmig	-21.48	221.29
MgO	flüssig	-502.46	50.35
MgO	fest	-568.96	26.94
$Mg(OH)_2$	gasförmig	-542.06	273.63
$Mg(OH)_2$	fest	-833.69	63.18
MgS	fest	-341.72	46.02
$MgSO_4$	fest	-1147.51	91.40
$MgSiO_3$	flüssig	-1415.39	92.52
$MgSiO_3$	fest	-1462.07	67.77
Mg_2SiO_4	flüssig	-2003.19	123.04
Mg_2SiO_4	fest	-2057.93	95.14
Mn	Mangan, gasförmig	238.49	173.59
Mn	α, fest	0.00	32.01
Mn^{2+}	wässrige Lösung	-228.03	-73.64
$MnCO_3$	fest	-816.72	85.77
$MnCl_2$	fest	-440.53	118.24

Mn ... Nb (Mangan bis Niob)

Formel	Name, Phase	*μ* in kG	*S*/*n* in Ct/mol
MnO	fest	-362,92	59,71
MnO_2	fest	-465,18	53,05
$Mn(OH)_2$	gefällt, amorph.	-615,05	99,16
MnS	grün, fest	-218,40	78,24
$MnSO_4$	fest	-957,42	112,13
$MnSiO_3$	fest	-1240,56	89,12
Mn_2O_3	fest	-881,15	110,46
Mn_2SiO_4	fest	-1632,18	163,18
Mn_3O_4	fest	-1283,23	155,64
Mo	Molybdän, gasförmig	612,54	181,84
Mo	fest	0,00	28,66
$Mo(CO)_6$	fest	-877,80	325,93
MoF_6	flüssig	-1473,1	259,66
MoO_2	fest	-533,04	46,28
MoO_3	fest	-668,02	77,74
MoS_2	fest	-225,94	62,59
N	Stickstoff, gasförmig	455,58	153,19
NFO	gasförmig	-51,04	247,99
NF_3	gasförmig	-83,26	260,62
NH_3	gasförmig	-16,48	192,34
NH_3	wässrige Lösung	-26,57	111,29
NH_4^+	wässrige Lösung	-79,37	113,39
NH_4Cl	α, fest	-203,19	94,98
NH_4NO_3	fest	-184,01	151,08
$NH_4H_2PO_4$	fest	-1214,35	151,90
$(NH_4)_2SO_4$	fest	-899,90	220,30
NO	gasförmig	86,57	210,65
NOCl	Nitrosylchlorid, gasf.	66,11	261,63
NO_2	gasförmig	51,30	239,95
NO_2^-	wässrige Lösung	-37,24	140,16
NO_2H	cis, gasförmig	-42,97	248,66
NO_2H	trans, gasförmig	-45,27	249,12
NO_3^-	wässrige Lösung	-111,34	146,44
NO_3H	gasförmig	-74,77	266,27
NO_3H	flüssig	-80,79	155,60
N_2	gasförmig	0,00	191,50
Na	Natrium, gasförmig	77,30	153,61
Na	flüssig	0,50	57,85
Na	fest	0,00	51,45
Na^+	wässrige Lösung	-261,89	58,99
$NaBH_4$	fest	-127,11	101,39

Formel	Name, Phase	*μ* in kG	*S*/*n* in Ct/mol
NaBr	gasförmig	-177,78	241,12
NaBr	fest	-349,26	86,82
$NaCO_3H$	Na-Hydrogencarb. fest	-851,86	102,09
$NaC_2H_3O_2$	Na-Acetat, fest	-608,84	123,10
NaCl	gasförmig	-201,32	229,70
NaCl	flüssig	-365,68	95,06
NaCl	fest	-384,04	72,13
$NaClO_4$	fest	-254,32	142,26
NaF	gasförmig	-309,74	217,50
NaF	fest	-545,09	51,21
NaI	fest	-284,57	98,32
$NaNO_3$	fest	-365,89	116,32
NaOH	gasförmig	-215,93	236,40
NaOH	flüssig	-375,13	74,17
NaOH	fest	-380,19	64,43
$NaSO_4H$	Na-Hydrogensulfat, fest	-992,86	112,97
Na_2CO_3	flüssig	-1031,88	155,39
Na_2CO_3	fest	-1048,08	138,78
$Na_2CO_3 \cdot 10\,H_2O$	fest	-3428,20	564,00
Na_2Cl_2	gasförmig	-565,94	325,52
Na_2O	fest	-379,11	75,04
Na_2O_2	fest	-449,66	94,81
Na_2S	fest	-361,36	97,91
Na_2SO_3	fest	-1002,07	146,02
Na_2SO_4	Thenardit, fest	-1269,35	149,62
$Na_2SO_4 \cdot 10\,H_2O$	fest	-3647,40	592,04
$Na_2S_2O_3$	fest	-1028,01	154,81
$Na_2S_2O_3 \cdot 5\,H_2O$	flüssig	-2227,72	438,69
$Na_2S_2O_3 \cdot 5\,H_2O$	fest	-2230,07	372,38
Na_2SiO_3	fest	-1467,38	113,85
$Na_2Si_2O_5$	fest	-2324,25	164,05
Na_3AlF_6	fest	-3114,10	238,00
Na_3PO_4	fest	-1787,16	173,64
Nb	Niob, gasförmig	681,16	186,15
Nb	fest	0,00	36,40
$NbBr_5$	fest	-510,45	259,41
NbC	fest	-136,82	35,40
$NbCl_3$	fest	-518,82	146,44
$NbCl_3O$	fest	-782,41	142,26
$NbCl_4$	fest	-606,68	184,10
$NbCl_5$	fest	-683,25	210,46
NbF_5	fest	-1699,12	160,25

Nb ... Pd (Niob bis Palladium)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
NbN	fest	-205,85	34,52
NbO	fest	-378,65	48,12
NbO_2	fest	-740,57	54,52
Nb_2O_5	fest	-1766,07	137,24
Ne	Neon, gasförmig	0,00	146,22
Ne	wässrige Lösung	19,25	66,11
Ni	Nickel, gasförmig	384,51	182,08
Ni	fest	0,00	29,87
Ni^{2+}	wässrige Lösung	-45,61	-128,87
$NiCO_3$	fest	-605,83	87,90
$Ni(CO)_4$	gasförmig	-587,27	410,45
$Ni(CO)_4$	flüssig	-588,27	313,38
$NiCl_2$	fest	-259,06	97,65
NiF_2	fest	-604,17	73,6
NiO	fest	-211,71	37,99
$Ni(OH)_2$	fest	-447,27	87,86
NiS	fest	-79,50	52,97
$NiSO_4$	fest	-759,81	92,05
Ni_3S_2	fest	-197,07	133,89
O	Sauerstoff, gasförmig	231,75	160,95
OH^-	wässrige Lösung	-157,29	-10,75
OH_2	Wasser, gasförmig	-228,59	188,72
OH_2	flüssig	-237,18	69,91
OH_2	fest	-236,59	44,77
OH_3^+	Oxonium-Ion, wäss. Lösung	-237,18	69,91
O_2	gasförmig	0,00	205,03
O_2H_2	gasförmig	-105,6	232,63
O_2H_2	flüssig	-120,42	109,62
O_2H_2	wässrige Lösung	-134,10	143,93
O_3	gasförmig	163,18	238,82
Os	Osmium, gasförmig	744,75	192,46
Os	fest	0,00	32,64
OsO_4	gelb, fest	-305,01	149,93
OsO_4	weiß, fest	-303,76	167,78
P	Phosphor, gasförmig	280,02	163,09
P	flüssig	0,09	42,89
P	rot, fest	-12,13	22,80
P	weiß, fest	0,00	41,09
PBr_3	flüssig	-175,73	240,16
PCl_3	gasförmig	-267,78	311,67
PCl_3	flüssig	-272,38	217,15
PCl_3O	gasförmig	-514,32	325,39
PCl_3O	flüssig	-520,91	222,46
PCl_5	gasförmig	-305,01	364,47
PF_3	gasförmig	-897,47	273,13
PF_5	gasförmig	-1520,72	300,70
PH_3	gasförmig	13,39	210,12
PO_4^{3-}	wässrige Lösung	-1018,80	-221,75
PO_4H^{2-}	wässrige Lösung	-1089,26	-33,47
$PO_4H_2^-$	wässrige Lösung	-1130,39	90,37
PO_4H_3	flüssig	-1118,43	146,44
PO_4H_3	fest	-1119,22	110,50
PO_4H_3	wässrige Lösung	-1142,65	158,16
P_4O_6	gasförmig	-2084,94	345,60
P_4O_{10}	gasförmig	-2669,85	403,76
P_4O_{10}	hexagonal, fest	-2697,84	228,86
Pb	Blei, gasförmig	161,92	175,26
Pb	flüssig	2,22	71,72
Pb	fest	0,00	64,81
Pb^{2+}	wässrige Lösung	-24,39	10,46
$PbBr_2$	fest	-261,92	161,50
$PbCO_3$	fest	-625,51	130,96
$PbCl_2$	fest	-314,13	135,98
$PbCl_4$	gasförmig	-276,20	384,51
PbF_2	fest	-617,14	110,46
PbI_2	fest	-173,64	174,85
$Pb(N_3)_2$	monoklin, fest	624,67	148,11
$Pb(N_3)_2$	orthorhombisch, fest	622,16	149,37
PbO	gasförmig	26,36	239,94
PbO	flüssig	-171,19	85,96
PbO	gelb, fest	-187,90	68,70
PbO	rot, fest	-188,95	66,53
PbO_2	fest	-217,36	68,62
$Pb(OH)_2$	fest	-421,07	88,00
PbS	fest	-98,74	91,21
$PbSO_4$	fest	-813,2	148,57
$PbSiO_3$	fest	-1062,15	109,62
Pb_3O_4	fest	-601,24	211,29
Pd	Palladium, gasförmig	339,74	166,94
Pd	fest	0,00	37,57
Pd^{2+}	wässrige Lösung	176,56	-117,15

Pd ... Si (Palladium bis Silizium)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
$PdCl_2$	fest	-125,10	104,60
PdI_2	fest	-62,76	150,62
PdS	fest	-66,94	46,02
PdS_2	fest	-74,48	79,50
Pt	Platin, gasförmig	520,49	192,30
Pt	fest	0,00	41,63
PtS	fest	-76,15	55,06
PtS_2	fest	-99,58	74,68
Rb	Rubidium, gasförmig	55,86	169,99
Rb	fest	0,00	69,45
Rb^+	wässrige Lösung	-282,21	124,26
RbBr	fest	-378,15	108,28
RbI	fest	-325,52	118,03
Re	Rhenium, gasförmig	724,67	188,83
Re	fest	0,00	36,86
$ReCl_3$	fest	-188,28	123,85
ReO_2	fest	-368,19	72,80
Re_2O_7	fest	-1066,08	207,11
Rh	Rhodium, gasförmig	510,87	185,70
Rh	fest	0,00	31,51
Ru	Ruthenium, gasförmig	595,80	186,40
Ru	fest	0,00	28,53
RuO_4	gasförmig	-139,75	289,95
RuO_4	flüssig	-152,3	183,26
RuO_4	fest	-152,3	146,44
S	Schwefel, gasförmig	238,28	167,71
S	flüssig	0,39	35,31
S	orthorhombisch, fest	0,00	32,07
S	monoklin, fest	0,04	32,75
S^{2-}	wässrige Lösung	85,77	-14,64
SF_6	gasförmig	-1105,41	291,71
SH_2	gasförmig	-33,56	205,69
SH_2	wässrige Lösung	-27,87	121,34
SO	gasförmig	-19,84	221,84
SO_2	gasförmig	-300,19	248,11
SO_3	gasförmig	-371,08	256,65
SO_3	β, fest	-368,99	52,30
SO_3^{2-}	wässrige Lösung	-486.60	-29.29

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
SO_3H^-	wässrige Lösung	-527,81	139,75
SO_3H_2	wässrige Lösung	-537,9	232,21
SO_4^{2-}	wässrige Lösung	-744,63	20,08
SO_4H^-	wässrige Lösung	-756,01	131,80
SO_4H_2	gasförmig	-656,09	289,11
SO_4H_2	flüssig	-690,06	156,9
S_2Cl_2	gasförmig	-31,80	331,37
Sb	Antimon, gasförmig	222,17	180,16
Sb	fest	0,00	45,69
$SbBr_3$	fest	-239,32	207,11
$SbCl_3$	gas	-301,25	337,69
$SbCl_3$	fest	-323,72	184,10
$SbCl_5$	gasförmig	-334,34	401,83
$SbCl_5$	flüssig	-350,20	301,25
Sb_2O_3	orthorhombisch, fest	-626,55	123,01
Sb_2O_4	fest	-795,8	127,19
Sb_2O_5	fest	-829,27	125,10
Sb_2S_3	schwarz, fest	-173,64	182,00
Sb_2Te_3	fest	-55,23	234,30
Sb_4O_6	kubisch, fest	-1268,17	220,92
Sc	Scandium, gasförmig	336,06	174,68
Sc	fest	0,00	34,64
ScF_3	fest	-1555,61	92,05
$Sc(OH)_3$	fest	-1233,44	100,42
Sc_2O_3	fest	-1819,41	77,40
Se	Selen, gasförmig	187,07	176,61
Se	hexagonal, schwarz, fest	0,00	42,44
SeF_6	gasförmig	-1016,71	313,76
SeH_2	gasförmig	15,90	218,91
SeO	gasförmig	26,82	233,89
Si	Silizium, gasförmig	411,29	167,86
Si	flüssig	40,83	44,46
Si	fest	0,00	18,83
$SiBr_4$	gasförmig	-431,79	377,77
$SiBr_4$	flüssig	-443,92	277,82
SiC	α, hexagonal, fest	-60,25	16,48
SiC	β, kubisch, fest	-62,76	16,61
$SiCl_4$	gasförmig	-617,01	330,62
$SiCl_4$	flüssig	-619,90	239,74
SiF_4	gasförmig	-1572,68	282,38

Si ... V (Silizium bis Vanadium)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
SiH_4	gasförmig	56,90	204,51
SiO	gasförmig	-126,36	211,50
SiO_2	gasförmig	-306,93	228,86
SiO_2	flüssig	-850,21	47,93
SiO_2	α-Cristobalit, fest	-853,67	50,05
SiO_2	β-Cristobalit, fest	-854,54	43,40
SiO_2	α-Quartz, fest	-856,67	41,84
SiO_2	β-Quartz, fest	-856,48	41,46
SiO_3H_2	fest	-1092,44	133,89
SiO_4H_4	fest	-1333,02	192,46
$Si_2O_5H_2$	fest	-1943,47	192,46
$Si_2O_7H_6$	fest	-2425,88	330,54
Si_3N_4	fest	-642,66	101,25
Sn	Zinn, gasförmig	267,36	206,03
Sn	α, grau, fest	0,13	44,14
Sn	β, weiß, fest	0,00	51,55
$SnBr_4$	gasförmig	-331,37	411,83
$SnBr_4$	fest	-350,20	264,43
$SnCl_4$	gasförmig	-432,21	365,68
$SnCl_4$	flüssig	-440,16	258,57
SnH_4	gasförmig	188,28	227,57
SnO	fest	-256,90	56,48
SnO_2	fest	-519,65	52,30
$Sn(OH)_2$	gefällt	-491,62	154,81
SnS	fest	-98,32	76,99
Sr	Strontium, gasförmig	110,04	164,54
Sr	fest	0,00	54,39
Sr^{2+}	wässrige Lösung,	-557,31	-39,33
$SrCO_3$	Strontianit, fest	-1137,63	97,49
$SrCl_2$	fest	-781,15	117,15
SrO	fest	-559,82	54,39
$SrSO_4$	fest	-1334,28	121,75
Te	Tellur, gasförmig	157,11	182,63
Te	fest	0,00	49,71
TeO_2	fest	-270,29	79,50
Ti	Titan, gasförmig	425,09	180,19
Ti	fest	0,00	30,63
$TiBr_3$	fest	-523,84	176,56
$TiBr_4$	fest	-589,53	243,51
TiC	fest	-180,75	24,23

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
$TiCl_2$	fest	-464,42	87,45
$TiCl_3$	fest	-653,54	139,75
$TiCl_4$	flüssig	-737,22	252,34
TiF_4	amorph	-1559,38	133,97
TiH_2	fest	-80,33	29,71
TiI_4	fest	-371,54	249,37
TiN	fest	-309,62	30,25
TiO	α, fest	-494,97	34,77
TiO_2	Anatas, fest	-884,50	49,92
TiO_2	Rutil, fest	-889,52	50,33
Ti_2O_3	fest	-1434,28	78,78
Tl	Thallium, gasförmig	147,44	180,85
Tl	fest	0,00	64,18
Tl^+	wässrige Lösung	-32,38	125,52
Tl^{3+}	wässrige Lösung	214,64	-192,46
$TlBr$	fest	-167,36	120,50
$TlCl$	fest	-184,93	111,25
TlI	fest	-125,39	127,61
$TlNO_3$	fest	-152,46	160,67
$TlOH$	fest	-195,76	87,40
Tl_2CO_3	fest	-614,63	155,23
Tl_2O	fest	-147,28	125,52
Tl_2S	fest	-93,72	150,62
Tl_2SO_4	fest	-830,48	230,54
U	Uran, gasförmig	478,82	198,52
U	fest	0,00	50,33
U^{3+}	wässrige Lösung	-520,49	-125,52
U^{4+}	wässrige Lösung	-579,07	-326,35
UBr_4	fest	-788,68	242,67
UC_2	fest	-175,73	58,58
UCl_4	fest	-962,32	198,32
UCl_6	fest	-1010,44	285,77
UF_4	fest	-1761,46	151,04
UF_6	fest	-2033,42	227,82
UI_4	fest	-527,60	271,96
UN	fest	-313,80	75,31
UO_2	fest	-1075,29	77,82
UO_3	fest	-1184,07	98,62
V	Vanadium, gasförmig	453,21	182,19
V	fest	0,00	28,91
V^{2+}	wässrige Lösung	-217,57	-129,7

V ... Zr (Vanadium bis Zircon)

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
V^{3+}	wässrige Lösung	-242,25	-230,12
VCl_2	fest	-405,85	97,07
VCl_3	fest	-511,28	130,96
VCl_3O	flüssig	-668,60	244,35
VCl_4	flüssig	-503,75	255,22
VF_5	flüssig	-1373,19	175,73
VN	fest	-191,21	37,28
VO	fest	-404,17	38,91
VSO_4	fest	-1169,85	108,78
V_2O_3	fest	-1139,30	98,32
V_2O_4	α, fest	-1318,38	102,51
V_2O_5	fest	-1419,63	130,96

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
W	Wolfram, gasförmig	807,09	173,84
W	flüssig	43,07	45,70
W	fest	0,00	32,64
WCl_6	α, fest	-455,65	238,49
WF_6	gasförmig	-1632,18	340,95
WF_6	flüssig	-1631,47	251,46
WO_2	fest	-533,92	50,54
WO_3	fest	-764,08	75,90

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Xe	Xenon, gasförmig	0,00	169,57
Xe	wässrige Lösung	13,39	65,69

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Zn	Zink, gasförmig	95,18	160,87
Zn	fest	0,00	41,63
Zn^{2+}	wässrige Lösung	-147,03	-112,13
$ZnBr_2$	fest	-312,13	138,49
$ZnCO_3$	fest	-731,57	82,42
$ZnCl_2$	fest	-369,43	111,46
ZnF_2	fest	-713,37	73,68
ZnI_2	fest	-208,95	161,08
ZnO	fest	-318,32	43,64
$Zn(OH)_2$	fest	-555,13	81,59
ZnS	Zinkblende, fest	-201,29	57,74
$ZnSO_4$	fest	-874,46	119,66

Formel	Name, Phase	μ in kG	S/n in Ct/mol
Zr	Zirconium, gasförmig	566,51	181,25
Zr	fest	0,00	38,99
ZrC	fest	-199,58	32,17
$ZrCl_4$	fest	-889,94	181,59
ZrF_4	β, monoklin, fest	-1810,00	104,60
ZrH_2	fest	-128,87	35,02
ZrN	fest	-336,39	38,87
ZrO_2	α, monoklin, fest	-1042,82	50,38

33.2 Tabelle der Trennenergien

Tab. 33.2 *Z* = Anzahl der Protonen *N* = Anzahl der Neutronen E_T = Trennenergie in pJ

	Z	*N*	E_T
H	1	0	0,00
		1	0,36
		2	1,36
He	2	1	1,24
		2	4,53
		3	4,39
		4	4,69
Li	3	2	4,22
		3	5,13
		4	6,29
		5	6,61
		6	7,26
Be	4	3	6,02
		4	9,05
		5	9,32
		6	10,41
		7	10,49
B	5	3	6,05
		4	9,02
		5	10,37
		6	12,21
		7	12,75
		8	13,53
C	6	3	6,25
		4	9,71
		5	11,77
		6	14,77
		7	15,56
		8	16,87
		9	17,06

	Z	*N*	E_T
N	7	5	11,86
		6	15,08
		7	16,77
		8	18,50
		9	18,90
		10	19,84
		11	20,30
O	8	6	15,82
		7	17,94
		8	20,45
		9	21,11
		10	22,40
		11	23,03
		12	24,25
F	9	8	20,54
		9	22,01
		10	23,68
		11	24,74
		12	26,04
		13	26,87
		14	28,08
Ne	10	7	18,09
		8	21,17
		9	23,04
		10	25,74
		11	26,82
		12	28,48
		13	29,31
		14	30,74
		15	31,42

	Z	*N*	E_T
Na	11	9	23,39
		10	26,13
		11	27,90
		12	29,89
		13	31,01
		14	32,45
		15	33,35
		16	34,44
Mg	12	9	23,90
		10	27,01
		11	29,12
		12	31,76
		13	32,94
		14	34,72
		15	35,75
		16	37,11
		17	37,72
Al	13	11	29,41
		12	32,13
		13	33,95
		14	36,04
		15	37,28
		16	38,79
		17	39,71
Si	14	12	33,01
		13	35,14
		14	37,90
		15	39,25
		16	40,95
		17	42,01
		18	43,48
		19	41,23

	Z	*N*	E_T
P	15	13	35,48
		14	38,34
		15	40,15
		16	42,12
		17	43,39
		18	45,01
		19	46,02
S	16	14	39,04
		15	41,13
		16	43,54
		17	44,93
		18	46,76
		19	47,88
		20	49,46
		21	50,15
		22	51,44
Cl	17	16	43,91
		17	45,75
		18	47,78
		19	49,15
		20	50,80
		21	51,78
		22	53,08
		23	54,01
		24	55,28
Ar	18	16	44,66
		17	46,70
		18	49,14
		19	50,55
		20	52,45
		21	53,50
		22	55,08
		23	56,06
		24	57,57
		25	58,47
		26	59,81

Tabelle der Trennenergien

	Z	N	E_T
K	19	18	49,44
		19	51,37
		20	53,47
		21	54,72
		22	56,33
		23	57,54
		24	59,09
		25	60,25
		26	61,68
		27	62,78
		28	64,12
Ca	20	18	50,17
		19	52,30
		20	54,80
		21	56,14
		22	57,98
		23	59,25
		24	61,04
		25	62,22
		26	63,89
		27	65,05
		28	66,65
		29	67,47
		30	68,49
Sc	21	21	56,83
		22	58,77
		23	60,32
		24	62,14
		25	63,54
		26	65,25
		27	66,57
		28	68,19
		29	69,16

	Z	N	E_T
Ti	22	21	57,55
		22	60,16
		23	61,68
		24	63,80
		25	65,22
		26	67,08
		27	68,39
		28	70,14
		29	71,16
		30	72,41
		31	73,28
V	23	23	62,54
		24	64,62
		25	66,31
		26	68,16
		27	69,66
		28	71,43
		29	72,60
		30	73,96
		31	74,94
Cr	24	22	61,20
		23	63,31
		24	65,92
		25	67,62
		26	69,70
		27	71,18
		28	73,11
		29	74,39
		30	75,94
		31	76,94
		32	78,27
Mn	25	25	68,35
		26	70,55
		27	72,23
		28	74,16
		29	75,60
		30	77,24
		31	78,40
		32	79,79
		33	80,81

	Z	N	E_T
Fe	26	25	69,13
		26	71,73
		27	73,44
		28	75,58
		29	77,07
		30	78,87
		31	80,09
		32	81,70
		33	82,76
		34	84,17
		35	85,06
		36	86,35
Co	27	27	74,14
		28	76,39
		29	78,01
		30	79,83
		31	81,21
		32	82,88
		33	84,08
		34	85,57
		35	86,63
		36	87,99
Ni	28	27	74,88
		28	77,54
		29	79,18
		30	81,14
		31	82,58
		32	84,41
		33	85,66
		34	87,36
		35	88,45
		36	90,00
		37	90,98
		38	92,42
		39	93,34

	Z	N	E_T
Cu	29	30	81,69
		31	83,30
		32	85,18
		33	86,60
		34	88,34
		35	89,61
		36	91,20
		37	92,33
		38	93,79
		39	94,80
Zn	30	31	84,15
		32	86,21
		33	87,67
		34	89,58
		35	90,85
		36	92,63
		37	93,76
		38	95,39
		39	96,43
		40	97,90
		41	98,84
		42	100,26
		43	101,12
Ga	31	33	88,30
		34	90,21
		35	91,67
		36	93,47
		37	94,80
		38	96,45
		39	97,67
		40	99,17
		41	100,21
		42	101,68
		43	102,71
		44	104,07

	Z	N	E_T
Ge	32	34	91,21
		35	92,67
		36	94,65
		37	95,97
		38	97,81
		39	99,00
		40	100,72
		41	101,81
		42	103,45
		43	104,49
		44	106,00
		45	106,97
		46	108,37
		47	109,29
As	33	37	96,69
		38	98,55
		39	99,90
		40	101,63
		41	102,91
		42	104,55
		43	105,72
		44	107,28
		45	108,39
		46	109,82
Se	34	37	97,66
		38	99,72
		39	101,07
		40	103,00
		41	104,29
		42	106,07
		43	107,26
		44	108,94
		45	110,06
		46	111,65
		47	112,72
		48	114,21
		49	115,14
		50	116,53

	Z	N	E_T
Br	35	41	105,16
		42	106,92
		43	108,25
		44	109,96
		45	111,22
		46	112,85
		47	114,07
		48	115,60
		49	116,70
		50	118,12
Kr	36	39	102,77
		40	104,82
		41	106,31
		42	108,23
		43	109,57
		44	111,42
		45	112,68
		46	114,44
		47	115,63
		48	117,32
		49	118,46
		50	120,04
		51	120,92
		52	122,05
		53	122,87
		56	129,78
Rb	37	45	113,61
		46	115,36
		47	116,76
		48	118,44
		49	119,83
		50	121,42
		51	122,39
		52	123,54
		53	124,46

	Z	N	E_T
Sr	38	43	111,43
		44	113,45
		45	114,87
		46	116,78
		47	118,15
		48	119,99
		49	121,34
		50	123,12
		51	124,14
		52	125,39
		53	126,32
		54	127,50
		55	128,34
Y	39	45	115,63
		46	117,50
		47	119,02
		48	120,92
		49	122,41
		50	124,25
		51	125,35
		52	126,62
		53	127,67
		54	128,87
		55	129,86
Zr	40	47	120,20
		48	122,18
		49	123,67
		50	125,59
		51	126,74
		52	128,13
		53	129,21
		54	130,52
		55	131,56
		56	132,82
		57	133,71
		58	134,74

	Z	N	E_T
Nb	41	48	122,87
		49	124,49
		50	126,42
		51	127,68
		52	129,10
		53	130,25
		54	131,61
		55	132,72
		56	134,01
Mo	42	48	123,96
		49	125,58
		50	127,61
		51	128,91
		52	130,46
		53	131,64
		54	133,10
		55	134,20
		56	135,58
		57	136,53
		58	137,86
		59	138,72
Tc	43	51	129,65
		52	131,24
		53	132,50
		54	134,02
		55	135,19
		56	136,62
		57	137,71
Ru	44	50	129,27
		51	130,70
		52	132,42
		53	133,72
		54	135,35
		55	136,54
		56	138,09
		57	139,18
		58	140,66
		59	141,66
		60	143,09
		61	144,03
		62	145,39
		63	146,26

Tabelle der Trennenergien

	Z	N	E_T
Rh	45	53	134,41
		54	136,08
		55	137,39
		56	138,97
		57	140,17
		58	141,66
		59	142,78
		60	144,22
		61	145,27
Pd	46	53	135,42
		54	137,20
		55	138,53
		56	140,22
		57	141,44
		58	143,04
		59	144,18
		60	145,71
		61	146,76
		62	148,24
		63	149,22
		64	150,63
		65	151,55
		66	152,90
Ag	47	56	140,89
		57	142,23
		58	143,84
		59	145,11
		60	146,64
		61	147,80
		62	149,28
		63	150,37
		64	151,78
		65	152,82
Cd	48	56	141,92
		57	143,28
		58	145,02
		59	146,29
		60	147,94
		61	149,12
		62	150,70
		63	151,82
		64	153,33
		65	154,38
		66	155,82
		67	156,81
		68	158,20
		69	159,13
		70	159,75
In	49	61	149,95
		62	151,56
		63	152,79
		64	154,30
		65	155,47
		66	156,91
		67	158,00
		68	159,41
Sn	50	59	147,92
		60	149,73
		61	151,04
		62	152,77
		63	154,01
		64	155,66
		65	156,87
		66	158,40
		67	159,51
		68	161,01
		69	162,05
		70	163,51
		71	164,49
		72	165,91
		73	166,86
		74	168,22
		75	169,14
		76	170,45
		77	171,34
Sb	51	67	160,30
		68	161,83
		69	162,95
		70	164,43
		71	165,52
		72	166,96
		73	168,00
		74	169,39
		75	170,39
		76	171,73
Te	52	65	158,42
		66	160,12
		67	161,33
		68	162,98
		69	164,14
		70	165,71
		71	166,83
		72	168,34
		73	169,39
		74	170,85
		75	171,86
		76	173,26
		77	174,24
		78	175,59
		79	176,54
		80	177,83
		81	178,77
I	53	70	166,50
		71	167,70
		72	169,23
		73	170,38
		74	171,84
		75	172,94
		76	174,35
		77	175,39
		78	176,77
		79	177,78
		80	179,22

	Z	N	E_T
Xe	54	67	162,92
		68	164,70
		69	165,95
		70	167,63
		71	168,84
		72	170,45
		73	171,61
		74	173,15
		75	174,26
		76	175,74
		77	176,80
		78	178,23
		79	179,26
		80	180,63
		81	181,67
		82	182,95
		83	183,59
Cs	55	75	175,13
		76	176,62
		77	177,77
		78	179,21
		79	180,31
		80	181,73
		81	182,81
		82	184,14
		83	184,84
Ba	56	71	170,47
		72	172,20
		73	173,43
		74	175,08
		75	176,28
		76	177,85
		77	179,00
		78	180,52
		79	181,63
		80	183,09
		81	184,20
		82	185,58
		83	186,33
		84	187,37
		85	188,09

	Z	N	E_T
La	57	78	181,32
		79	182,51
		80	183,98
		81	185,17
		82	186,58
		83	187,41
		84	188,49
		85	189,30
Ce	58	75	177,95
		76	179,61
		77	180,87
		78	182,46
		79	183,65
		80	185,21
		81	186,41
		82	187,88
		83	188,75
		84	189,90
		85	190,73
		86	191,83
		87	192,59
Pr	59	79	184,38
		80	185,95
		81	187,22
		82	188,72
		83	189,66
		84	190,83
		85	191,76

	Z	N	E_T
Nd	60	79	185,37
		80	187,05
		81	188,30
		82	189,88
		83	190,86
		84	192,11
		85	193,03
		86	194,25
		87	195,09
		88	196,27
		89	197,08
		90	198,26
		91	199,11
		92	200,28
Pm	61	81	188,97
		82	190,57
		83	191,61
		84	192,88
		85	193,88
		86	195,11
		87	196,06
		88	197,22
		89	198,12
Sm	62	80	188,51
		81	189,89
		82	191,57
		83	192,66
		84	194,00
		85	195,02
		86	196,33
		87	197,27
		88	198,55
		89	199,44
		90	200,77
		91	201,71
		92	202,98
		93	203,91

	Z	N	E_T
Eu	63	85	195,71
		86	197,03
		87	198,06
		88	199,33
		89	200,34
		90	201,71
		91	202,74
		92	204,05
		93	205,06
		94	206,26
Gd	64	85	196,69
		86	198,09
		87	199,13
		88	200,51
		89	201,51
		90	202,93
		91	203,96
		92	205,33
		93	206,35
		94	207,62
		95	208,57
		96	209,77
		97	210,67
Tb	65	91	204,81
		92	206,22
		93	207,30
		94	208,60
		95	209,63
		96	210,86
		97	211,86
Dy	66	87	200,66
		88	202,15
		89	203,25
		90	204,76
		91	205,88
		92	207,33
		93	208,42
		94	209,79
		95	210,83
		96	212,14
		97	213,15
		98	214,37
		99	215,29
		100	216,42

Tabelle der Trennenergien

	Z	N	E_T
Ho	67	95	211,67
		96	213,02
		97	214,08
		98	215,37
		99	216,37
		100	217,54
Er	68	92	208,96
		93	210,12
		94	211,60
		95	212,70
		96	214,12
		97	215,18
		98	216,54
		99	217,57
		100	218,82
		101	219,78
		102	220,94
		103	221,85
		104	222,95
Tm	69	97	215,93
		98	217,33
		99	218,42
		100	219,71
		101	220,77
		102	221,97
		103	222,97
Yb	70	96	215,76
		97	216,89
		98	218,34
		99	219,44
		100	220,80
		101	221,86
		102	223,14
		103	224,16
		104	225,36
		105	226,29
		106	227,39
		107	228,28
		108	229,37
Lu	71	101	222,61
		102	223,93
		103	225,01
		104	226,24
		105	227,25
		106	228,38
		107	229,34
Hf	72	99	220,98
		100	222,43
		101	223,55
		102	224,93
		103	226,01
		104	227,31
		105	228,34
		106	229,56
		107	230,54
		108	231,72
		109	232,63
		110	233,71
		111	234,56
Ta	73	105	229,13
		106	230,39
		107	231,46
		108	232,67
		109	233,64
		110	234,75
W	74	104	228,99
		105	230,10
		106	231,44
		107	232,52
		108	233,81
		109	234,80
		110	235,99
		111	236,91
		112	238,06
		113	238,94
		114	240,03
Re	75	107	233,23
		108	234,58
		109	235,62
		110	236,85
		111	237,84
		112	239,02
		113	239,96
		114	241,09
Os	76	106	232,97
		107	234,09
		108	235,50
		109	236,56
		110	237,89
		111	238,90
		112	240,18
		113	241,13
		114	242,37
		115	243,30
		116	244,51
		117	245,40
		118	246,54
Ir	77	111	239,60
		112	240,91
		113	241,93
		114	243,22
		115	244,22
		116	245,46
		117	246,43
		118	247,59
Pt	78	109	237,94
		110	239,40
		111	240,48
		112	241,90
		113	242,93
		114	244,32
		115	245,33
		116	246,67
		117	247,64
		118	248,91
		119	249,85
		120	251,06
		121	251,95
		122	253,12
Au	79	115	246,14
		116	247,48
		117	248,55
		118	249,84
		119	250,88
		120	252,10
		121	253,10
Hg	80	113	244,54
		114	246,01
		115	247,11
		116	248,53
		117	249,62
		118	250,98
		119	252,05
		120	253,33
		121	254,33
		122	255,57
		123	256,53
		124	257,73
		125	258,64
Tl	81	119	252,81
		120	254,13
		121	255,23
		122	256,49
		123	257,55
		124	258,76
		125	259,80
		127	261,51
Pb	82	119	253,70
		120	255,10
		121	256,21
		122	257,55
		123	258,63
		124	259,92
		125	261,00
		126	262,18
		127	262,81
		128	263,65
		129	264,26
		130	265,08

	Z	N	E_T
Bi	83	123	259,20
		124	260,49
		125	261,60
		126	262,79
		127	263,53
		128	264,35
		129	265,05
Po	84	122	258,78
		123	259,90
		124	261,25
		125	262,36
		126	263,59
		127	264,32
At	85	123	260,33
		124	261,68
		125	262,83
		126	264,07
		127	264,88
		128	265,84
		130	267,58
Rn	86	121	258,29
		124	262,32
		125	263,48
		126	264,76
		132	270,29
		136	273,68
Fr	87	122	259,98
		125	263,82
		128	267,07
		133	271,75
		136	274,52
Ra	88	134	273,76
		135	274,58
		136	275,62
		137	276,40
		138	277,43
		139	278,16
		140	279,18

	Z	N	E_T
Ac	89	135	275,27
		136	276,34
		137	277,20
		138	278,25
		139	279,05
Th	90	138	279,27
		139	280,11
		140	281,20
		141	282,02
		142	283,05
		143	283,82
		144	284,81
Pa	91	138	279,94
		139	280,86
		140	281,96
		141	282,85
		142	283,89
U	92	141	283,86
		142	284,95
		143	285,80
		144	286,85
		145	287,67
		146	288,66
		147	289,43
Np	93	143	286,58
		144	287,63
		145	288,51
		146	289,50
Pu	94	143	287,47
		144	288,59
		145	289,50
		146	290,54
		147	291,38
		148	292,39
		149	293,20
Am	95	145	290,20
		146	291,26
		147	292,15
		148	293,17
		149	294,03

	Z	N	E_T
Cm	96	150	296,05
		151	296,88
		152	297,87
		153	298,63
Bk	97	149	295,70
		150	296,76
Cf	98	153	300,42
		154	301,41
Es	99	153	301,08
		154	302,10
Fm	100	156	304,82
		157	305,61
Md	101	156	305,41
		157	306,26
No	102	156	306,20
		157	307,08
Lr	103	153	303,51
		154	304,65
		157	307,59
Rf	104	157	308,25
Db	105	156	307,66
		157	308,67
Sg	106	157	309,17
Bh	107	155	307,05

33.3 Periodensystem der Elemente

Tab. 33.3

C ← Abkürzung
6 12.0 ← Masse / Stoffmenge in g/mol
↑ Ordnungszahl

	Hauptgruppen I	II	Nebengruppen III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A	VIII A	VIII A	I A	II A	Hauptgruppen III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H 1 1.0																	He 2 4.0
2	Li 3 6.9	Be 4 9.0											B 5 10.8	C 6 12.0	N 7 14.0	O 8 16.0	F 9 19.0	Ne 10 20.2
3	Na 11 23.0	Mg 12 24.3											Al 13 27.0	Si 14 28.1	P 15 31.0	S 16 32.1	Cl 17 35.5	Ar 18 39.9
4	K 19 39.1	Ca 20 40.1	Sc 21 45.0	Ti 22 47.9	V 23 50.9	Cr 24 52.0	Mn 25 54.9	Fe 26 55.8	Co 27 58.9	Ni 28 58.7	Cu 29 63.5	Zn 30 65.4	Ga 31 69.7	Ge 32 72.6	As 33 74.9	Se 34 79.0	Br 35 79.9	Kr 36 83.8
5	Rb 37 85.5	Sr 38 87.6	Y 39 88.9	Zr 40 91.2	Nb 41 92.9	Mo 42 95.9	Tc 43 97	Ru 44 101.1	Rh 45 102.9	Pd 46 106.4	Ag 47 107.9	Cd 48 112.4	In 49 114.8	Sn 50 118.7	Sb 51 121.8	Te 52 127.6	I 53 126.9	Xe 54 131.3
6	Cs 55 132.9	Ba 56 137.3	La 57 138.9	Hf 72 178.5	Ta 73 180.9	W 74 183.9	Re 75 186.2	Os 76 190.2	Ir 77 192.2	Pt 78 195.1	Au 79 197.0	Hg 80 200.6	Tl 81 204.4	Pb 82 207.2	Bi 83 209.0	Po 84 209	At 85 210	Rn 86 222
7	Fr 87 223	Ra 88 226	Ac 89 227	Rf 104 261	Db 105 262													

Lanthanide	Ce 58 140.1	Pr 59 140.9	Nd 60 144.2	Pm 61 145	Sm 62 150.4	Eu 63 152.0	Gd 64 157.3	Tb 65 158.9	Dy 66 162.5	Ho 67 164.9	Er 68 167.3	Tm 69 168.9	Yb 70 173.0	Lu 71 175.0
Actinide	Th 90 232	Pa 91 231	U 92 238	Np 93 237	Pu 94 244	Am 95 243	Cm 96 247	Bk 97 247	Cf 98 251	Es 99 254	Fm 100 257	Md 101 258	No 102 259	Lr 103 260