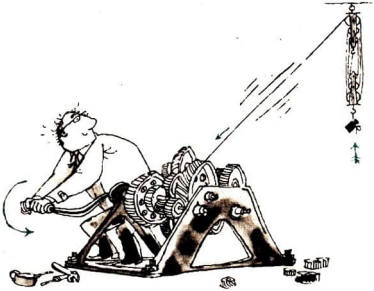
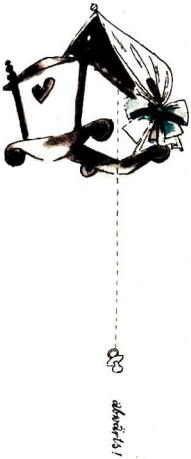
WALTER CONRAD

Streifzüge durch die Physik

LEIPZIG - JENA - BERLIN



Die Erde läßt uns nicht los



Physik beginnt in der Wiege! Die ersten physikalischen Erfahrungen sammelt der junge Erdenbürger, wenn ihm der Schnuller „außenbords" fällt und er ein hilfeheischendes Gebrüll anstimmt. Das Schreien gewöhnt man ihm ab. Doch niemand kann verhindern, daß alle Körper zu Boden fallen, wenn sie Gelegenheit dazu finden.

Die Erde sucht festzuhalten, was sich auf ihr befindet. Nicht immer scheint das angenehm, und wenn wir nach einer unter den Schrank gerollten Schraube fahnden, sind wir kaum Überlegungen zugänglich wie der, daß wir ohne die anziehende Kraft unseres Planeten nicht existieren könnten. Aber es ist tatsächlich so: Ließe sich die Erdanziehung „abschalten", so müßte sich die Atmosphäre schnell in den Weltraum verflüchtigen, und alle beweglichen Gegenstände würden von der ständig rotierenden Erde abgeschleudert wie Papierschnitzel von einer sich drehenden Schallplatte.

Die Anziehungskraft ist keine Besonderheit unseres Heimatplaneten. Weltraumfahrer werden sich auf dem Mond, auf der Venus und wo sie je hinkommen mögen, ebenfalls nach zu Boden gefallenen Dingen bücken müssen. Überall im Weltall gilt ein Naturgesetz, dessen Entdeckung und exakte Formulierung wir dem großen Engländer Isaac Newton (1643 bis 1727) verdanken. Es ist das sogenannte „Gravitationsgesetz". Wir wollen auf seine mathematische Fassung verzichten und es so umschreiben: Zwei Körper – gleich, welcher Art und Größe – ziehen einander stets an, und zwar um so mehr, je größer die in ihnen vereinte Stoffmenge ist. Außerdem hängt die Anziehungskraft vom Abstand der Körper ab; mit wachsender Entfernung vermindert sie sich rasch, bei Annäherung der Körper wächst sie schnell. Bei Verdoppelung des Abstandes sinkt sie auf $^1/_4$, bei Verdreifachung auf $^1/_9$.

Also ziehen zwei Bücher, zwei Äpfel, zwei Steine einander an? Das ist wirklich der Fall. Allerdings bleibt, da Buch, Apfel und Stein eine nur geringe Stoffmenge verkörpern, diese Anziehungskraft so geringfügig, daß sie mit den Meßmethoden des täglichen Lebens überhaupt nicht feststellbar ist. Selbst die gegenseitige Anziehung zweier großer Lokomotiven auf benachbarten Gleisen ließe sich nur mit empfindlichen Geräten nachweisen.

Ganz anders steht es um die gegenseitige Anziehung der Himmelskörper. Die Entfernung zwischen ihnen ist zwar sehr groß, doch stellen sie meistens so gewaltige Ansammlungen stofflicher Materie dar, daß fast unvorstellbar große Anziehungskräfte wirken. Das Gravitationsgesetz und die in ihm zum Ausdruck kommende „Massenanziehung" sind daher wichtige Hilfsmittel für die Arbeit der Astronomen. Die Bewegung der Erde um die Sonne wird ebenso durch das Gravitationsgesetz bestimmt wie der Umlauf aller anderen Planeten. Auch Kometen und Meteoriten sind an den Fahrplan gebunden, den ihnen das Gravitationsgesetz vorschreibt.

Für Raketentechniker ist die Massenanziehung nicht minder wichtig. Gleich, ob sie die Bahn eines Satelliten oder die Treibladung einer Trägerrakete bestimmen: Grundlage ihrer Berechnungen ist stets das Gravitationsgesetz. Auch bei Flügen zu unseren Nachbarplaneten werden sich Raumschiffe auf Bahnen bewegen, die durch Newtons Gesetz bestimmt sind. Segelschiffen im Passat ähnlich werden sie große Teile ihres Weges nur unter der anziehenden Wirkung der Himmelskörper zurücklegen und ihren Treibstoff für wichtige Manöver sparen.

Wir kennen jedoch auch recht greifbare irdische Auswirkungen der Massenanziehung und des Gravitationsgesetzes: Die Anziehungskräfte zwischen Erde und Mond zwingen nicht nur den Erdbegleiter auf seine Bahn, sondern rufen auch den Wechsel von Ebbe und Flut hervor. Er wird uns vielleicht in „Gezeitenkraftwerken" eines Tages große Mengen an Elektroenergie liefern.

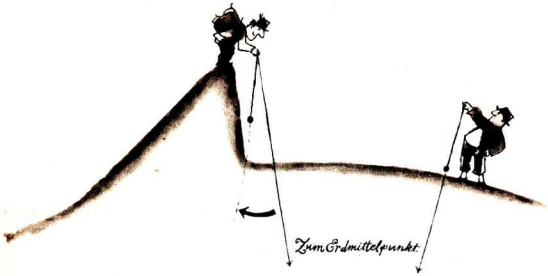
Es gibt ein an Einfachheit kaum zu überbietendes Instrument, dessen Wirkung wir ebenfalls der Massenanziehung verdanken. Ein Stein, an einer Schnur oder an einem dünnen Draht hängend, wird zum Lot. Er kann zwar nicht fallen, sucht aber der Erde, genauer dem Erdmittelpunkt, möglichst nahe zu kommen. Die gespannte Schnur weist daher „senkrecht nach unten", das heißt zum Erdmittelpunkt.

Nicht immer allerdings gibt das Lot genau die „Lotrechte" an. Halten wir es zum Beispiel an eine steile Felswand, so wird es auch vom Berg angezogen und weicht zur Seite ab. Gleiches geschieht, wenn seitwärts vom Lot besonders schwere Körper unter der Erdoberfläche verborgen sind. Zwar bleiben die Abweichungen sehr gering – aber sie sind meßbar, und damit bekommen sie große praktische Bedeutung: Eine Erzlagerstätte inmitten leichterer Gesteine zum Beispiel verrät sich durch sie. Man kann den Fundort durch zahlreiche Messungen im Gelände einkreisen und seine Lage genau feststellen. Dabei benutzt die „Gravimetrik" (so nennt man jene Methoden der angewandten Physik, die Änderungen der Erdanziehung bei der Suche nach Bodenschätzen anwenden) allerdings kein einfaches Lot, sondern komplizierte Präzisionsinstrumente, die auch kleinste Abweichungen der Erdanziehung sicher feststellen. Bei der Suche nach Erdöl haben sich gravimetrische Verfahren ebenfalls bewährt.

Kehren wir in den Alltag zurück! Daß Gegenstände fallen, ist also eine Folge der Anziehungskraft, die die Erde auf jeden Körper ausübt. Wir nennen sie „Schwerkraft".

Das Gravitationsgesetz spricht von *gegenseitiger* Anziehung. Es dürfte demnach nicht nur der Dachziegel zur Erde fallen, sondern die Erde müßte ihm auch ein Stück „entgegenfallen". Das tut sie wirklich, doch ist wegen der Größe des Erdballs dieses Entgegenkommen unmeßbar gering.

Je fester die Erde einen Körper hält, desto schwerer nennen wir ihn, desto größer ist sein „Gewicht". Zwei Ziegelsteine sind doppelt so schwer wie einer; sechs Exemplare eines Buches sind sechsmal schwerer als das Einzelstück. Offensichtlich hängt also das Gewicht eines Körpers von der in



ihm enthaltenen Stoffmenge ab. Wird sie größer, wächst es; verringert sie sich, nimmt es ab.
Schwerer, leichter: Das sind recht grobe Angaben, mit denen weder der Techniker noch der Physiker viel anfangen kann. Beide wollen genau wissen: Wievielmal schwerer? Um wieviel leichter? Sie wollen das Gewicht messen.
Messen heißt im Grunde nichts anderes, als mit einer festgelegten „Maßeinheit" vergleichen: Wandern wir 15 km, so legen wir eine Strecke zurück, die 15mal größer ist als die Längeneinheit Kilometer.
Maßeinheit des Gewichts ist das Kilopond (kp). Es sollte – und hier müssen wir uns einmal einer streng wissenschaftlichen Terminologie befleißigen – sein:

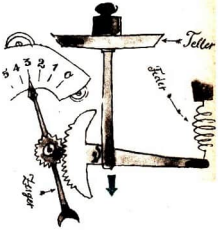
„Die Kraft, mit der die Erde einen Liter Wasser bei 4 °C auf 45 Grad geografischer Breite in Meereshöhe anzieht."

Es wäre freilich sehr umständlich, immer erst einen Liter Wasser genau abzumessen, wenn die Gewichtseinheit gebraucht wird. Deshalb fertigte man aus einer sehr widerstandsfähigen Legierung einen Zylinder an, dessen Gewicht dem des Liters Wasser (unter den genannten Bedingungen) gleichen sollte. Dieser Zylinder wird in Paris aufbewahrt und ist der Urahn aller auf der Erde verwendeten Gewichtsmaße. Seine Söhne sind genauestens gearbeitete Kopien, die anderen Ländern überlassen wurden; seine Enkel und Urenkel sind die Millionen von Kilopondgewichten in aller Welt.
Der tausendste Teil des Kiloponds ist das Pond (p), das dem Gewicht eines Kubikzentimeters Wasser entsprechen müßte. Sehr große Gewichte messen wir in Megapond (1 Mp = 1000 kp).
„Sollte", „müßte" – warum diese Vorsicht in der Ausdrucksweise? Das Pariser Urkilopond ist eben nicht genauso schwer wie ein Liter Wasser. Der Metallzylinder war, wie sich später herausstellte, um eine Kleinigkeit *zu* schwer geraten. Sollte man nun in sämtlichen Staaten die Gewichtseinheiten korrigieren? Das wäre nicht nur recht umständlich gewesen, sondern hätte auch niemandem genützt; denn es kam letzten Endes nur darauf an, eine allgemein gültige, brauchbare Gewichtseinheit zu besitzen. Die aber hatte man im „zu schweren Kilopond"; der Liter Wasser interessierte die Praktiker ohnehin nicht. Außerdem ist der „Fehler" so geringfügig,

daß er bei den meisten Messungen überhaupt keine Rolle spielt. Fast immer können wir gewichtsmäßig „Kilopond" und „Liter Wasser" gleichsetzen, wobei der Vollständigkeit halber erwähnt sei, daß ein Liter fast genau dem Rauminhalt eines Kubikdezimeters entspricht.

Zuckertüte auf Reisen

Wer Zucker einkauft und die Tüte sorgfältig im Koffer verwahrt, könnte mit Hilfe ihres Inhaltes am Nordpol oder in Zentralafrika einen ebenso großen Kuchen backen wie auf dem Mond, der Venus oder dem Fixstern XY 24641. Das ist selbstverständlich, denn an der Zuckermenge, an der Zahl der Zuckerkörnchen, ändert sich während der Reisen nichts.
Bleibt auch das Gewicht der Zuckermenge dasselbe? Ist sie am Nordpol ebenso schwer wie in Ekuador? Vorsicht, nicht gleich mit „selbstverständlich!" antworten! Blättern wir zwei Seiten zurück, so entdecken wir in der Definition des Kiloponds die Forderung, der als Gewichtseinheit dienende Liter Wasser habe auf dem 45. Breitengrad und überdies in Meereshöhe zu stehen. Physiker drücken sich so knapp wie möglich aus – ihre Einschränkung muß daher einen besonderen Grund haben.
Die Physik ist eine Wissenschaft der Versuche. Deshalb wollen wir, wenigstens in Gedanken, experimentell nachprüfen, wie sich das Gewicht bei einer Ortsveränderung verhält. Außer der Zuckertüte brauchen wir dazu lediglich eine Waage.
Wir wählen eine Federwaage, wie sie noch heute in vielen Küchen zu finden ist: Das zu bestimmende Gewicht belastet eine Schraubenfeder, die sich unter seinem Einfluß dehnt. Die Dehnung ist ein Maß für die Größe des Gewichts: Doppeltes Gewicht bewirkt doppelte Dehnung, dreifaches Gewicht eine dreifache Dehnung . . .



Beginnen wir unsere Versuche auf dem 45. Grad nördlicher Breite, wo wir uns so lange Zucker abfüllen lassen, bis die Waage genau 1 kp (1000 p) zeigt. Reisen wir nach Norden, so werden wir bald überrascht feststellen: Der Zucker wird schwerer! Setzen wir unsere große Fahrt nun bis zum Nordpol fort, so können wir dort an der Waage 1002,5 p ablesen. Das Gewicht des Zuckers hat sich also ohne unser Zutun um rund $^1/_4$ % vergrößert.

Kehren wir zum 45. Breitengrad zurück, so „stimmt" das Gewicht wieder. Die Waage zeigt 1000 p an. Fahren wir weiter nach Süden, so wird der Zucker leichter und erreicht am Äquator mit 997,5 p sein Minimalgewicht. Von dort ab nimmt sein Gewicht wieder zu, beträgt bei 45 Grad südlicher Breite 1000 p und am Südpol 1002,5 p. Ein Körper ist also – denn selbstverständlich gilt unsere Beobachtung auch für beliebige andere Gegenstände – am Äquator am leichtesten, an den Polen am schwersten.

Zwei Ursachen hat diese Erscheinung: Da die Erde keine mathematisch genaue Kugelgestalt aufweist, sondern nach den Polen hin abgeplattet ist, befindet sich ein Körper am Nord- oder Südpol dem Erdmittelpunkt näher, als wenn er sich am Äquator aufhält. Er wird infolgedessen an den Polen kräftiger angezogen. Außerdem wirkt auf jeden Körper eine Kraft, die ihn von der sich drehenden Erde abzuschleudern sucht (vgl. S. 71) und somit der Schwerkraft entgegenwirkt. Sie ist am Äquator am größten, lupft also dort einen Körper am meisten an, während sie zu den Polen hin abnimmt.

Selbstverständlich wird der Zucker auch leichter, wenn man ihn auf einen Berg schafft, denn dadurch vergrößert sich die Entfernung zum Erdmittelpunkt ebenfalls. Wir können unsere Gedankenreise noch weiter fortsetzen: Klettern wir höher und höher, so sinkt das Gewicht immer mehr 6370 km über der Erde (in einer Höhe, die dem Erdradius gleich ist) hat es sich bereits auf ein Viertel verringert. Im Abstand von 25480 km (das ist der vierfache Erdradius) würde die Waage sogar nur noch 40 p anzeigen.

Da wir uns in dieser Höhe ohnehin im Weltraum befinden, wollen wir gleich einflechten, daß die Schwerkraft selbstverständlich von Himmelskörper zu Himmelskörper verschieden ist. Unsere Tüte voll Zucker würde auf dem Mond nur 165 p, auf dem Jupiter dagegen mehr als 2,5 kp wiegen.

Wichtig ist: Ein Gegenstand ist nur „schwer", solange er sich im Anziehungsbereich eines Himmelskörpers befindet. Ein Körper für sich allein, isoliert von allen anderen, hätte kein Gewicht. Könnten wir auf einer Weltraumreise die Zuckertüte der Anziehungskraft sämtlicher Gestirne entziehen, so bliebe der Zeiger der Waage in Ruhe – der Zucker wöge nichts mehr!

Unsere Erde „wiegt" ebenfalls nichts – auch wenn oft vom Gewicht des Erdballs gesprochen und geschrieben wird. Allenfalls könnte man das Gewicht des Planeten Erde in bezug auf die Sonne angeben.

Hat unter diesen Umständen ein genaues Wiegen überhaupt Sinn? Ist es nicht unnütze Arbeit, das Gewicht eines Körpers bis auf Bruchteile eines tausendstel Pond zu bestimmen, wenn der erhaltene Wert nur für einen ganz bestimmten Ort auf der Welt gilt?

Nun, ganz so pessimistisch brauchen wir nicht zu sein. Einmal läßt sich die jeweilige Größe der Schwerkraft bei Präzisionsmessungen berücksichtigen; zum anderen ist der auftretende Fehler sehr gering. Auch im ungünstigsten Falle, zwischen Pol und Äquator, ändert sich das Gewicht eines Körpers nur um rund 0,5 %, ein Betrag, der für die tägliche Praxis belanglos ist.

Außerdem gibt es ein einfaches Mittel, Schwerkraftänderungen beim Wiegen überhaupt auszuschalten. Hätten wir auf unsere Reise statt der Federwaage eine Balkenwaage mit dem zugehörigen Gewichtssatz mitgenommen, wären uns die Schwerkraftänderungen entgangen. Haben wir durch Zucker auf der einen und Gewichtsstücke auf der anderen Waagschale die Waage einmal ins Gleichgewicht gebracht, so bleibt dieses Gleichgewicht erhalten, wohin wir auch gehen. Jetzt wirkt sich nämlich jede Schwerkraftänderung gleichermaßen auf den Zucker *und* auf die ihn ausbalancierenden Gewichte aus.

Freilich dürfen wir nun nicht mehr behaupten, wir hätten das *Gewicht* des Zuckers festgestellt; denn das Gewicht ändert sich von Ort zu Ort – daran ist nicht zu rütteln. Was mißt dann aber die Balkenwaage? Was ist es, das sich am Zucker während all seiner Reisen nicht geändert hat?

Die Antwort haben wir eigentlich bereits am Anfang dieses Kapitels gegeben: Die Stoffmenge in der Tüte bleibt stets gleich. Der Physiker beschreibt sie mit dem Begriff „Masse". Während ein Körper für sich allein kein Gewicht hat, besitzt er doch stets eine Masse; sie verkörpert die in ihm enthaltene Stoffmenge, ist gewissermaßen seine primitivste und zugleich typischste Eigenschaft und bleibt unabhängig von seinem Aufenthaltsort.

Einheit der Masse ist das Kilogramm. Es wird dargestellt durch die Masse eines Liters Wasser von 4 °C. Der tausendste Teil dieser Masseneinheit ist das Gramm.

Ein Liter Wasser hat also eine *Masse* von 1 kg – und zwar überall; er *wiegt* 1 kp –, allerdings nur in Meereshöhe und auf dem 45. Breitengrad.

Daß dadurch sehr leicht Verwechslungen möglich sind, liegt auf der Hand. Sie wurden noch dadurch gefördert, daß die

Bezeichnung Kilogramm bis in die jüngste Zeit für die Massen- *und* die Gewichtseinheit benutzt wurde. Selbst erfahrene Physiker mußten sich oft erst überlegen, ob in einem bestimmten Fall das „Massekilogramm" oder das „Gewichtskilogramm" gemeint war. Auch Vorschläge wie der, die beiden „kg" durch ein Sternchen wenigstens in der Fachliteratur zu unterscheiden, änderten nichts an diesem Wirrwarr.
Die von Fachleuten seit Jahrzehnten immer wieder vorgeschlagene und in unserer Republik nunmehr gesetzlich eingeführte Unterscheidung nach „kp" und „kg" schließt Verwechslungen aus.
Und nun erwarten wir die Leserfrage: Kaufen wir Leberwurst nach Kilopond oder Kilogramm? Die salomonische Antwort: Es kommt ganz darauf an, wie wir wiegen.

Meistens interessiert uns vor allem die Stoffmenge, die Masse, die wir erhalten – das wären also Gramm bzw. Kilogramm. Die Balkenwaage wiegt sie ab – genauer ausgedrückt: Sie vergleicht die unbekannte Masse eines Körpers mit einer bekannten Masse. Das ist möglich, weil gleiche Massen am gleichen Ort von der Erde gleich stark angezogen werden. Alle Waagen, die wie die Balkenwaage mit „Gegengewichten" arbeiten – beispielsweise auch Briefwaagen und Schnellwaagen in Geschäften –, bestimmen Massen.
Die Federwaage dagegen wiegt in „Pond". Im täglichen Leben kommt es auf dasselbe heraus, welche Einheit wir wählen. Ein „Viertel" Leberwurst besitzt eine Masse von 125 g und ein Gewicht von fast genau 125 p.

Heureka!

Was ist leichter, Aluminium oder Blei? Geben Sie es zu, eben haben Sie gedacht: „Dumme Frage, natürlich Aluminium!" Dann wäre also ein Schrotkügelchen aus Blei schwerer als das Aluminiumgestänge Ihrer Fernsehantenne? Sie widersprechen: „Selbstverständlich meinte ich, daß beispielsweise 1 m Aluminiumdraht leichter ist als 1 m gleich dicken Bleidrahtes!" Unwillkürlich stellt man sich gleich große und gleich gestaltete Körper vor, wenn man derartige Fragen beantwortet. Jedermann weiß ja, daß das Gewicht eines Körpers nicht nur von dem Stoff abhängt, aus dem er besteht, sondern auch von seinen Abmessungen.
Der Einfluß des Materials auf das Gewicht eines Körpers

läßt sich durch das Verhältnis Gewicht zu Rauminhalt ausdrücken. 1 cm³ Blei wiegt eben mehr als 1 cm³ Aluminium, und 1 cm³ Aluminium wiederum ist schwerer als 1 cm³ Holz. Entsprechendes gilt für 2, 3 oder 56 cm³. Für jeden Stoff – ganz gleich, ob fest, flüssig oder gasförmig – ist das Verhältnis Gewicht zu Rauminhalt charakteristisch. Dieses Verhältnis nennt man Wichte:

$$\text{Wichte} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Rauminhalt}}$$

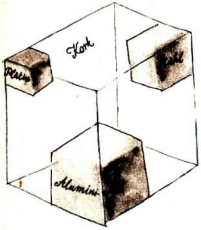
oder, mit abkürzenden Buchstaben geschrieben:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \left[\frac{p}{cm^3}\right]$$

Der griechische Buchstabe γ (gesprochen „gamma") wird allgemein zur Kennzeichnung der Wichte verwendet; die Klammer hinter der Formel nennt uns die Einheiten, in denen wir messen müssen. Wird also für Aluminium die Wichte 2,7 p/cm³ angegeben, so heißt das einfach, daß 1 cm³ Aluminium 2,7 p wiegt. 2 cm³ wiegen dementsprechend 5,4 p. 1 cm³ Wasser wiegt (unter den auf Seite 8 genannten Bedingungen) 1 p. Demnach hat Wasser die Wichte 1 p/cm³.

Wichte fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe

Stoff	Wichte in p/cm³	Stoff		Wichte in p/cm³
Aluminium	2,7	Kork		0,24
Stahl	7,3–7,9	Buchenholz (lufttrocken)		0,75
Kupfer	8,9	Eichenholz (lufttrocken)		0,7–1,03
Zink	7,1			
Magnesium	1,74	Benzin	bei 15 °C	0,7
Blei	11,4	Alkohol	bei 15 °C	0,79
Quecksilber	13,6	Petroleum	bei 15 °C	0,82
Silber	10,3	Olivenöl		0,91
Gold	19,4	Tetrachlorkohlenstoff		1,6
Platin	21,5			
Iridium	22,4	Luft		0,001 293
Lithium	0,53			
		Leuchtgas	bei 0 °C und 760 Torr	0,000 6
Glas	2,4–3,9	Kohlendioxyd	bei 0 °C und 760 Torr	0,001 977
Porzellan	2,3	Wasserstoff	bei 0 °C und 760 Torr	0,000 09



Alle vier Würfel haben gleiches Gewicht

Überlegen Sie sich einmal, was die Zahlen der Tabelle bedeuten! Ein Kubikdezimeter Lithium zum Beispiel, also ein Würfel von 10 cm Kantenlänge, wiegt nur 530 p, während ein gleich großer Würfel aus Buchenholz schon 750 p wiegt. Der entsprechende Würfel aus Iridium, einem sehr schweren und widerstandsfähigen Metall, aber wäre gar nicht mehr mit einer Hand zu halten; er wöge 22,4 kp, also fast einen halben Zentner!

Woher kennt man diese Zahlen? Wie kann man überhaupt die Wichte eines Stoffes feststellen? Zweierlei ist dazu nötig: Wir müssen sein Gewicht und seinen Rauminhalt messen. Für das Gewicht gibt es Waagen. Und die Bestimmung des Rauminhaltes? Bei einem regelmäßig geformten Körper hilft die Mathematik weiter. Das Volumen eines Würfels, einer Kugel, eines Zylinders läßt sich mit wenigen Messungen und Berechnungen rasch feststellen.

Doch wie ermittelt man zum Beispiel den Rauminhalt eines Steinbrockens? Einfache Berechnungsmethoden für den Inhalt unregelmäßig geformter Körper gibt es nicht – es fällt den Mathematikern leichter, die Bahn eines entfernten Himmelskörpers zu bestimmen als das genaue Volumen eines knorrigen Astes.

Zum Glück hat uns schon Archimedes (287 bis 212 v. u. Z.), einer der berühmtesten griechischen Mathematiker und Physiker, ein Verfahren angegeben, mit dessen Hilfe wir auch den Rauminhalt noch so verschnörkelter Dinge mit hinlänglicher Genauigkeit bestimmen können.

Man hatte Archimedes mit einem recht verzwickten Auftrag bedacht: Er sollte feststellen, ob in einer für einen Tempel bestimmten Krone tatsächlich alles Gold verarbeitet war, das König Hiero von Syrakus dem Goldschmied hatte übergeben lassen. Das Gewicht stimmte zwar – aber konnte der Schmied das Gold nicht durch ein anderes Metall verfälscht haben?

Archimedes überlegte: War die Krone „echt", so mußte sie ebensoviel Raum beanspruchen wie ein gleich schwerer Klumpen Goldes. Die Prüfung lief also darauf hinaus, den Rauminhalt der Krone mit dem eines gleich schweren Goldklumpens zu vergleichen. Doch wie? Weder dem Goldklumpen noch der Krone war mit geometrischen Gesetzen beizukommen.

Der zündende Einfall kam dem griechischen Weisen während eines Bades: Krone und Goldklumpen mußten genausoviel Wasser verdrängen, wie ihrem Rauminhalt entsprach.

Das war die Lösung, denn die Wasserverdrängung ließ sich leicht feststellen. Archimedes soll von seinem Gedanken so begeistert gewesen sein, daß er Bad Bad sein ließ und splitterfasernackt mit dem Ruf „Heureka!" (ich hab's) in den Palast Hieros stürmte – ein Verhalten, das den Syrakusern Stoff für manchen Klatsch geliefert haben dürfte. Übrigens stellte es sich heraus, daß der Goldschmied tatsächlich betrogen hatte . . .

Heute würden wir die Krone in ein „Überlaufgefäß" legen und die verdrängte Wassermenge an der Skala eines Meßgefäßes ablesen. Das Archimedische Verfahren ist also noch nicht veraltet, sondern wurde in den vergangenen 2200 Jahren nur verfeinert.

Um die Wichte einer Flüssigkeit festzustellen, braucht man nur eine Flüssigkeitsmenge bekannten Rauminhalts abzuwiegen. Es geht jedoch noch „eleganter": Ein schwimmender Körper taucht um so tiefer in eine Flüssigkeit, je geringer ihre Wichte ist (vgl. S. 109). Darauf beruht die Senkspindel (auch Aräometer genannt). Eine an beiden Enden geschlossene Glasröhre ist an ihrem unteren Ende so beschwert, daß sie aufrechtstehend schwimmt. In der Röhre ist eine Skala angebracht. Je größer die Wichte der zu messenden Flüssigkeit ist, desto weniger tief taucht die Spindel ein. Der Flüssigkeitsspiegel steht in Höhe eines bestimmten Skalenstriches, an dem die Wichte abgelesen wird.

Die Senkspindel erübrigt langwierige Messungen. Ihre große Bedeutung rührt außerdem daher, daß man mit ihr auch die Konzentration von Lösungen oder das Mischungsverhältnis verschiedener Flüssigkeiten feststellen kann, da sich die Wichte entsprechend ändert. So gibt es Senkspindeln, die den Alkoholgehalt einer Flüssigkeit sofort in Prozenten

abzulesen gestatten; andere wieder zeigen die Konzentratior einer Säure, einer Zucker- oder Salzlösung an.

Die Wichte von Gasen ist, wie unsere Tabelle erweist, viel geringer als die von festen und flüssigen Stoffen. Sie wird außerdem sehr stark von der Temperatur und vom Druck beeinflußt. Zur Wichtebestimmung kann man eine Gasmenge bestimmten Rauminhalts abwiegen. Daneben erlauben andere Eigenschaften der Gase Rückschlüsse auf ihre Wichte. Oft gibt man die Wichte von Gasen auch in „kp/Nm³" an. Nm³ ist der „Normkubikmeter", das heißt ein Kubikmeter Gas von 0 °C und einem Druck von 760 Torr (vgl. S. 113).

Was nützt die Kenntnis der Wichte? Oft gibt sie einen ersten Hinweis auf die Natur eines unbekannten Stoffes. Der Technologe, der die Wichte einer Legierung bestimmt, bekommt wertvolle Anhaltspunkte über ihre Bestandteile und ihre Zusammensetzung. Dem Geologen, der den Erzgehalt eines Minerals feststellen soll, hilft die Wichtebestimmung weiter. Dem Maschinenbauer verraten Wichtetabellen, um wieviel seine Maschinen leichter werden, wenn es gelingt, für bestimmte Teile Materialien geringerer Wichte zu verwenden. Der Flugzeugkonstrukteur muß immer wieder die Wichte seiner Werkstoffe in die Berechnungen einbeziehen, wenn er Gewicht, Nutzlast, Motorenleistung und Wirtschaftlichkeit eines Flugzeugs errechnet. „Hochwertige Werkstoffe geringer Wichte!" – Diese Forderung steht seit 50 Jahren in der Luftfahrttechnik im Vordergrund, aber sie gilt genauso für alle anderen Produktionszweige. In jüngster Zeit haben sich die Chemiker der Gewichts- und Wichteverminderung besonders angenommen: Sie schufen und schaffen zahlreiche neue Werkstoffe, die nicht nur viel leichter, sondern auch fester und widerstandsfähiger als die herkömmlichen sind. Zahlreiche Leichtmetallegierungen und Plastmaterialien sind bekannte Beispiele dafür.

Hochspannungsleitungen wurden früher aus Kupfer angefertigt. Heute greift man immer häufiger zu Aluminium. Dadurch wird nicht nur das wertvolle Kupfer gespart, sondern die Leitungen werden auch leichter. Eine Aluminiumleitung wiegt trotz ihres größeren Durchmessers nur etwa halb soviel wie eine für die Energieübertragung gleichwertige Kupferleitung – eine Folge der geringen Wichte des Aluminiums.

Wieviel Kohle, wieviel Zement, wieviel Kies, wieviel Kalk lagert in einem Bunker? Kennt man seine Abmessungen und die Wichte des Lagergutes, ist die Frage schnell beantwortet.

Sogar in der Küche spielt die Wichte eine Rolle! Da gibt es Meßgefäße, an deren Rand zahlreiche Skalen angebracht sind: „Reis", „Mehl", „Zucker", „Hülsenfrüchte" steht daran – und ohne Waage kann man bestimmte Mengen dieser Stoffe abmessen. Die „theoretische Grundlage" liefert natürlich die Wichte: Man hat sie für die wichtigsten Nahrungsmittel festgestellt und danach die Meßgefäße entsprechend markiert. Sehr genau sind solche Meßbecher natürlich nicht; doch sie sind nicht schlechter als manche Küchenwaage.

Vom Spiel der Muskeln

Was ist Kraft? Vermutlich schütteln Sie den Kopf: „Kraft – na, das weiß doch jedes Kind – Kraft ist, um es genau zu sagen, das . . . nein, also Kraft ist zum Beispiel notwendig, um einen Nagel einzuschlagen oder um Holz zu hacken. Demnach handelt es sich bei der Kraft um . . . Was soll überhaupt diese Frage? Schließlich ist es Sache des Autors, *meine* Fragen zu beantworten!"

So etwa könnte Ihre Antwort lauten. Sie haben uns lediglich verraten, was man mit einer Kraft anfangen kann; was Kraft ist, haben Sie nicht gesagt. Ärgern Sie sich nicht! Auch ein Physiker hätte nicht viel besser antworten können. In der Tat sind Kräfte nur an ihren Wirkungen zu erkennen und zu beschreiben.

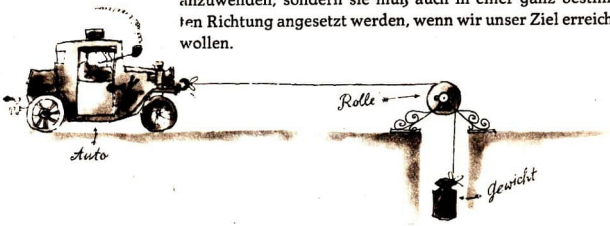
Wenn wir Kloben hacken, verändert unsere Muskelkraft die Gestalt des Holzes. Nicht anders ist es, wenn wir einen Draht zu einer Öse biegen, ein Gummiband oder eine Feder dehnen, eine Leiste zerbrechen oder Teig kneten. Was immer wir uns an Beispielen ausdenken mögen, stets ist festzustellen: Ohne Kraftaufwand keine Verformung. Wir schließen daraus: Wo eine Verformung auftritt, muß eine Kraft wirken.

Wenn eine Tür zuschlägt, wissen wir, daß eine Kraft die Ursache dafür war; um ein Fahrrad in Bewegung zu setzen oder zu bremsen, ist Kraft nötig. Ein Ball rollt erst, nachdem er durch Muskelkraft angestoßen wurde. Was immer wir uns an Beispielen ausdenken mögen, stets ist festzustellen: Ohne Kraftaufwand keine Bewegungsänderung. Das gilt, wenn wir einen Körper aus der Ruhe in Bewegung setzen; das gilt, wenn wir ihn abbremsen; das gilt sogar, wenn wir lediglich seine Bewegungsrichtung verändern wollen; denn es bedarf

einer Kraft, um einen rollenden Ball zur Seite zu lenken. Wir schließen daraus: Wo eine Bewegungsänderung zu beobachten ist, muß eine Kraft ihre Ursache sein, und wir fassen zusammen:

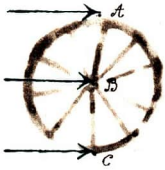
Kräfte können einen Körper verformen oder seinen Bewegungszustand ändern.

Meistens treten Form- und Bewegungsänderungen gleichzeitig auf: Denken wir nur an einen springenden Ball oder an Eisenbahnpuffer während des Rangierens.
Form- und Bewegungsänderungen sind gemeinsame Wirkungen und Merkmale sämtlicher Kräfte. Sie reichen aber nicht aus, um eine Kraft näher zu beschreiben.
Wie groß ist eine Kraft? Um das angeben zu können, brauchen wir eine Krafteinheit. Wir kennen sie bereits: Das Kilopond, das uns als Gewichtseinheit begegnete, wird gleichzeitig auch benutzt, um die Größe von Kräften festzulegen. Zweierlei berechtigt zu dieser recht praktischen Vereinbarung: Einmal ist auch das Gewicht eine Kraft, die Kraft nämlich, mit der die Erde einen Körper festhält. Außerdem aber könnte man – wenigstens theoretisch – jede Kraft durch ein Gewicht ersetzen, auch wenn die technische Verwirklichung dieses Gedankens oft auf unüberwindliche Schwierigkeiten stoßen dürfte.
Der Steckbrief einer Kraft ist mit der Größenangabe noch längst nicht vollständig. Es kommt auch auf ihre Richtung an. Für Segler ist nicht nur die Windstärke, sondern vor allem auch die Windrichtung wichtig. Nach welcher Seite ein Ball fliegt, hängt davon ab, in welcher Richtung er gestoßen wird. Wenn wir einen Schrank an Ort und Stelle rücken wollen, genügt es nicht, eine Kraft von soundsoviel Kilopond anzuwenden, sondern sie muß auch in einer ganz bestimmten Richtung angesetzt werden, wenn wir unser Ziel erreichen wollen.



„Aller guten Dinge sind drei!" Fast könnte man meinen, Kräfte seien dieser einem alten Aberglauben entsprungenen Redensart unterworfen. Wir brauchen nämlich noch eine dritte Angabe, um eine Kraft und ihre Wirkung zu beschreiben. Es kommt nicht nur darauf an, wie groß eine Kraft ist und in welcher Richtung sie wirkt, sondern auch darauf, wo sie an einem Körper angreift.

Das skizzierte Rad dreht sich im Uhrzeigersinn, wenn wir es in *A* anstoßen. Bei einem Stoß in *B* dagegen bleibt es ruhig stehen, während es sich gegen den Uhrzeiger dreht, wenn wir die Kraft in *C* angreifen lassen.



Wir haben in der Skizze die Kraft durch einen Pfeil dargestellt. So wollen wir es von nun ab immer halten; denn die Techniker machen es ebenso. Wie nützlich solche „Kraftpfeile" sind, werden wir bald erkennen, wenn wir es mit mehreren Kräften zu tun bekommen. Einstweilen merken wir uns:

Die Länge eines Kraftpfeils entspricht der Größe der durch ihn dargestellten Kraft. Dazu muß allerdings ein „Kräftemaßstab" vereinbart werden, der uns Auskunft gibt, welcher Kraft eine bestimmte Längeneinheit entsprechen soll. So kann man etwa festlegen, daß 1 cm Pfeillänge einer Kraft von 10 kp entsprechen soll.

Die Richtung des Kraftpfeils stimmt mit der Richtung der durch ihn dargestellten Kraft überein; sein „Schwanz" setzt am Angriffspunkt der Kraft an.

Geometrie muß sein

Ein Kraftwagen surrt über den Asphalt. Zuverlässig, Kilometer um Kilometer treibt ihn die Kraft seines Motors voran. Ist es die einzige Kraft, der das Fahrzeug unterworfen ist? Auch wer noch nie etwas von Physik hörte, wird sofort mit „Nein!" antworten. Selbstverständlich wirken noch andere Kräfte: Luftwiderstand und Reibung suchen die Fahrt zu hemmen, Seitenwind drückt, und in jeder Kurve treten weitere Kräfte auf, die den Wagen aus der Bahn zu tragen suchen. Vergessen wir schließlich nicht, daß das Fahrzeug wie jeder Körper auf der Erde ständig dem Einfluß der Schwerkraft ausgesetzt ist.

Nicht nur Fahrzeuge, sondern die meisten Dinge unterliegen gleichzeitig mehreren Kräften. Daher ist die Frage, wie sich

ein Körper unter dem Einfluß mehrerer Kräfte verhält, für Physik und Technik sehr wichtig.

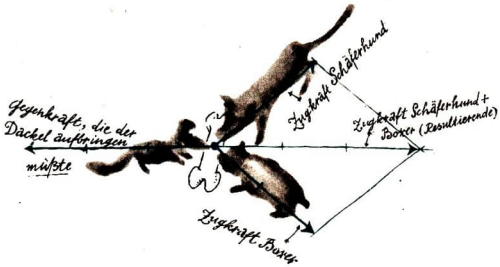
Recht einfach ist der Fall zu übersehen, wenn mehrere Kräfte in einer Richtung wirken. Wird ein Wagen von zwei gleich starken Pferden gezogen, und schirrt man später eines davon ab, so verringert sich die Zugkraft um die Hälfte. Ebenso ist klar, daß drei Pferde eine dreimal so große Zugkraft ausüben wie eines.

Wie verhält sich ein Körper, wenn er entgegengesetzt gerichteten Kräften ausgesetzt ist? Wir brauchen nur beim Tauziehen zuzusehen, um es zu erfahren. Sind beide Mannschaften gleich stark, so bleibt das Seil in Ruhe. Die an ihm wirkenden Zugkräfte treten nach außen hin nicht in Erscheinung. Gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte heben einander auf.

Sobald eine Mannschaft stärker ist, wird das Seil nach der entsprechenden Seite gezogen. Es sieht aus, als sei nur *eine* Kraft wirksam, die das Seil nach rechts oder links bewegt. Die Größe dieser Gesamtkraft erhalten wir, indem wir die gegeneinander wirkenden Kräfte voneinander subtrahieren. Zieht zum Beispiel die linke Mannschaft mit einer Kraft von 250 kp, die rechte mit einer Kraft von 265 kp, so bewegt sich das Seil nach rechts, als zöge an ihm ausschließlich eine Kraft von 15 kp.

Etwas komplizierter wird es, wenn Kräfte unter verschiedenen Richtungen angreifen. Wie etwa schätzen Sie die Aussichten des Dackels in unserer Abbildung ein, bei dem Streit um den Knochen nicht vom Platz gezogen zu werden?

Zwei Fälle können wir schon beschreiben: Zerren die beiden großen Hunde in der gleichen Richtung, so addieren sich ihre Kräfte. Die Lage für den Dackel ist hoffnungslos. Zerren



sie dagegen gleichstark, aber einander genau entgegengesetzt, so heben sich ihre Kräfte auf – der Dackel kann in aller Ruhe warten, bis seine Gegner müde geworden sind. Der Knochen bleibt an Ort und Stelle.

Jedermann hat auch eine ungefähre Vorstellung davon, wie der Kampf verläuft, wenn die beiden großen Hunde nach verschiedenen Richtungen ziehen: Der arme Dackel wird dann in eine Richtung geschleift, die zwischen den Zugrichtungen liegt. Beide Kräfte wirken wie *eine* Kraft in einer Zwischenrichtung. Dieser Gesamtkraft – der Physiker nennt sie Resultierende – muß der Dackel eine mindestens gleich große, aber nach der entgegengesetzten Seite weisende Kraft entgegensetzen, wenn er das Feld behaupten will.

Die Resultierende läßt sich nach Größe und Richtung berechnen. Einfacher ist es allerdings, sie mit Hilfe des „Kräfteparallelogramms" zeichnerisch zu ermitteln – eine Methode, die in Entwurfs- und Konstruktionsbüros sehr häufig angewandt wird.

Bleiben wir, um sie kennenzulernen, zunächst bei unserem Beispiel. Wir stellen die Zugkräfte der großen Hunde durch Kraftpfeile dar, die vom gemeinsamen Angriffspunkt, dem Knochen, ausgehen und im gleichen Kräftemaßstab gezeichnet werden müssen. Diese beiden Kraftpfeile ergänzen wir zu einem Parallelogramm. Dann gibt uns seine vom Angriffspunkt der Kräfte ausgehende Diagonale Richtung und Größe der gesuchten Resultierenden an. In unserem Beispiel zog jeder Hund mit einer Kraft von 4 kp, und es läßt sich sofort ablesen, daß der Dackel einer Kraft von mehr als 6 kp die Waage halten muß.

Einfacher geht es nun wirklich nicht! Bleistift, Papier, Lineal und Dreieck oder Zirkel – mehr brauchen wir nicht, um Kräfte mit Hilfe des Parallelogrammverfahrens zusammenzusetzen.

Unser Hundebeispiel war, wir wollen es zugeben, ein bißchen an den Haaren herbeigezogen. Untersuchen wir daher eine uns näherliegende Anwendungsmöglichkeit des Kräfteparallelogramms.

Wer radfahren lernt, kann zuerst geradeaus fahren; die Kurven bereiten ihm Kummer, und erfahrungsgemäß läßt er sich lieber umfallen, ehe er einem Hindernis auszuweichen versucht.

Wie kommt das? Der Radfahrer auf gerader Strecke unterliegt vor allem der Schwerkraft. Sie wirkt senkrecht nach unten; ihr Kraftpfeil weist genau auf die Verbindungslinie der Rad-

aufsetzpunkte. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, kippt das Rad beim Geradeausfahren nicht (vgl. S. 33).

Das Bild zeigt, daß wir den Angriffspunkt der Schwerkraft ungefähr in die Körpermitte verlegt haben. Wir wollen uns im Augenblick darüber nicht den Kopf zerbrechen – einer der nächsten Abschnitte wird uns aufklären.

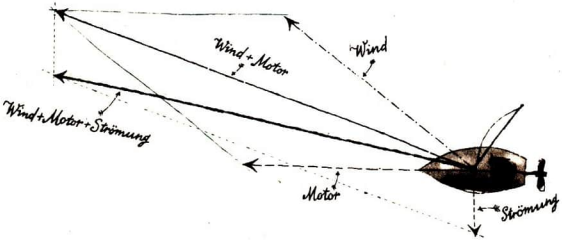
Sobald das Fahrrad eine Kurve fährt, tritt eine weitere Kraft auf, die aus der Kurve weist (vgl. S. 71). Diese Kraft und die Schwerkraft setzen sich zu einer schräg nach unten gerichteten Kraft zusammen. Sie zeigt neben der Verbindungslinie der Radaufsetzpunkte zum Boden; das Rad droht zu kippen. Um nicht zu stürzen, legt sich der Radfahrer so weit in die Kurve, daß die Resultierende aus Schwerkraft und seitwärts ziehender Kraft wieder die Verbindungslinie der Radaufsetzpunkte trifft. Wie weit er sich zur Seite neigen muß, hängt vom Körpergewicht, von der Geschwindigkeit und vom Kurvenradius ab. Sehr bald hat der Radfahrer es im Gefühl, wie weit er sich in die Kurve neigen muß.

Ein Kraftwagen kann sich nicht in die Kurve legen; deshalb werden Straßenkrümmungen „überhöht". Durch die geneigte Straßenfläche wird erreicht, daß die Resultierende aus Fahrzeuggewicht und zur Seite ziehender Kraft das Fahrzeug an den Boden drückt.

Genaugenommen „stimmt" die Kurvenerhöhung jeweils nur für ein bestimmtes Fahrzeuggewicht und eine bestimmte Geschwindigkeit. Die Überhöhung wird daher nach einem aus der Erfahrung gewonnenen Mittelwert abgeleitet. Daraus folgt: Ein Kraftwagen kann auch aus einer überhöhten Kurve getragen werden, wenn die zur Seite weisende Kraft wegen zu hoher Geschwindigkeit zu sehr anwächst.

Das Kräfteparallelogramm gilt für zwei Kräfte. Doch was ist zu tun, wenn drei oder noch mehr Kräfte zusammenzusetzen sind? Auch dann hilft die Parallelogrammethode: Man kombiniert erst zwei Kräfte, um dann ihre Resultierende mit der dritten Kraft zusammenzusetzen und so fort. Dabei ist die Reihenfolge des Zusammensetzens gleichgültig.

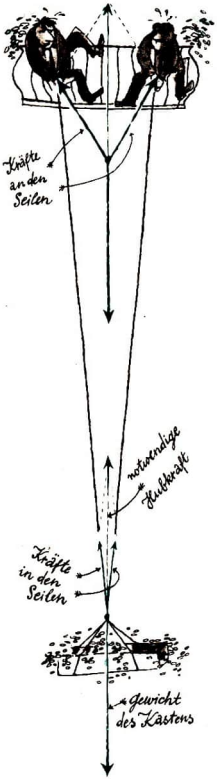
Ein mit Hilfsmotor ausgestattetes Segelboot sei gleichzeitig drei Kräften ausgesetzt: Kräftiger Südostwind wirkt auf seine Segel; der Hilfsmotor sucht das Boot genau nach Westen zu treiben; schließlich drückt eine schwache Strömung das Boot nach Süden. Wollen wir wissen, wie diese Kräfte zusammenwirken, so setzen wir zunächst Windkraft und Motorkraft nach dem Kräfteparallelogramm zusammen. Wir gewinnen die gestrichelte Resultierende. Sie gibt die Kraft an,



der das Boot durch Motor und Wind allein ausgesetzt wäre. Mit dieser Kraft kombinieren wir die durch die Strömung verursachte Kraft. Die Resultierende dieses Parallelogramms gibt uns die Kraft an, der das Boot tatsächlich unterliegt. Fingen wir die Zusammensetzung mit Motor- und Strömungskraft an, kämen wir zum gleichen Endergebnis.
Gäbe es noch eine vierte, fünfte oder sechste Kraft, so würden wir entsprechend weiter verfahren.

Kräfteparallelogramm — andersherum!

Es ist in jedem Jahr dasselbe: Sobald die Frühlingssonne zu wärmen beginnt, gehen unsere Nachbarn daran, den sommerlichen Blumenschmuck ihres Balkons vorzubereiten. Die frisch gestrichenen Holzkästen werden im Hof mit Erde gefüllt und anschließend zum Balkon emporgehievt. Das vollzieht sich unter Einsatz mehrerer Familienmitglieder und einer Wäscheleine, etwa so, wie es auf der nächsten Seite dargestellt ist.
Auf den ersten Metern geht alles gut, doch sobald ein Kasten in größerer Höhe schwebt, stöhnt und ächzt es erschreckend vom Nachbarbalkon. Ein befreiender Seufzer begrüßt jeden glücklich oben angelangten Blumenkasten.
„Wenn die Dinger beim Hochziehen nur nicht immer schwerer würden!" Aber, verehrte Nachbarin, schon Ihr Sprößling würde Sie aufklären, daß sich das Gewicht der Kästen beim Hochziehen nicht ändert.
„Aber wir müssen uns doch während der letzten Meter besonders anstrengen!" Das stimmt allerdings, und wir wollen



diesem scheinbaren Widerspruch einmal auf den Grund gehen – es lohnt sich.

Um einen der Kästen heben zu können, müssen wir sein Gewicht durch eine gleichgroße, aber in entgegengesetzter Richtung wirkende Kraft überwinden. Würde man den Kasten mit *einem* Seil emporziehen, so fiele diese von unseren Muskeln aufzubringende Hubarbeit in die Richtung des Seiles. Die Nachbarn aber benutzen zwei Seilenden. Keines davon verläuft in der „Sollrichtung" der Hubkraft. Trotzdem macht sich das Gewicht des Blumenkastens an jedem Seil und an den Händen der Hebenden bemerkbar. Daraus folgt, daß die aufzuwendende Gegenkraft sich auf die beiden Seile verteilt.

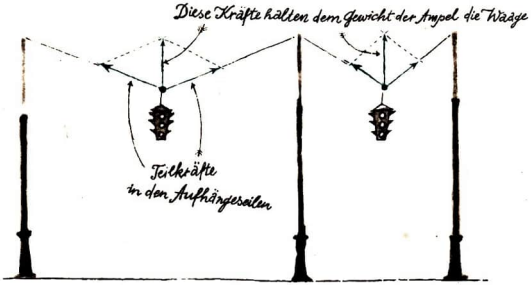
Wie groß ist jede Teilkraft, jede „Komponente"? Daß die verdächtig naheliegende Antwort „gleich dem halben Gewicht" falsch ist, zeigt die Beobachtung, daß die an den Seilen aufzubringenden Kräfte mit zunehmender Höhe wachsen. Nur eines läßt sich bereits mit Bestimmtheit sagen: Wenn wir die Komponenten zusammensetzen, muß das Ergebnis stets die Hubkraft sein. „Zusammensetzen" – dieses Wort fordert geradezu auf, es auch diesmal mit dem Kräfteparallelogramm zu versuchen. Allerdings müssen wir die Parallelogrammmethode andersherum anwenden: Bisher kannten wir zwei Kräfte und suchten ihre Resultierende. Diesmal ist die Resultierende, die Hubkraft, bekannt, und die Aufgabe lautet, sie in zwei Teilkräfte zu zerlegen.

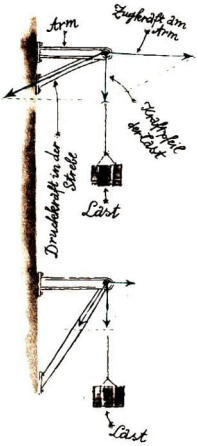
Die Hubkraft ist Diagonale des gesuchten Kräfteparallelogramms. Damit allein kämen wir allerdings nicht weiter: Es ließen sich unzählig viele Parallelogramme zeichnen, deren Diagonale der Hubkraft entspräche. Die Auswahl wird jedoch dadurch erleichtert, daß wir die Richtungen der Parallelogrammseiten kennen: Die gesuchten Komponenten fallen in die Seilrichtungen.

Der Rest ist eine Kleinigkeit: Mit Lineal und Dreieck läßt sich sofort das Kräfteparallelogramm zeichnen, dessen Seiten uns die Größe der gesuchten Komponenten angeben.

Damit findet das scheinbare „Schwererwerden" der Blumenkästen ebenfalls seine Aufklärung: Je höher ein Kasten gehoben wird, desto größer wird der Winkel zwischen den Parallelogrammseiten und desto größer werden auch die Teilkräfte, die sich zur Hubkraft zusammensetzen. Die Geschichte mit den Blumenkästen scheint wenig praktische Bedeutung zu besitzen. Doch dieser Schein trügt: Techniker müssen ebensohäufig eine Kraft in Komponenten zerlegen wie mehrere Kräfte zu einer Resultierenden zusammensetzen.

Wandeln wir unser Beispiel etwas ab! An die Stelle des Blumenkastens tritt eine Lampe, ein Lautsprecher, eine Verkehrsampel oder irgendeine andere aufzuhängende Last; die Stelle der Wäscheleine nehmen zwei Halteseile ein. Welcher Beanspruchung sind sie ausgesetzt? Was müssen sie aushalten? Diese Fragen werden wie das Blumenkasten-Beispiel gelöst. Wir brauchen daher unsere Skizze nicht weiter zu kommentieren. Wichtig ist auch hier wieder: Je größer der Winkel zwischen den Halteseilen, das heißt je straffer die Aufhängung, desto größeren Kräften sind die Halteseile ausgesetzt. Selbst bei kleinem Winkel, also auch bei großem Durchhang, hat jedes Seil *mehr* zu tragen als die halbe Last.
Bisher haben wir das Gewicht der Halteseile nicht berücksichtigt. Sehr oft jedoch ist gerade dieses Gewicht die einzige Last zwischen zwei Aufhängepunkten, eine Last, die sich gleichmäßig auf die ganze Seillänge verteilt. Das ist der Fall bei Freileitungen jeder Art, vom Hochspannungs-Überlandnetz bis zur einfachen Telefonleitung. Auch für sie gelten ähnliche Überlegungen wie für den Blumenkasten unserer Nachbarn, und wieder lassen sich die Kräfte mit Methoden bestimmen, denen das Kräfteparallelogramm zugrunde liegt. Die Zugkräfte nehmen auch diesmal mit wachsender Straffung rasch zu. Sie können das selbst beobachten, wenn Sie sich vergeblich mühen, eine Wäscheleine „ganz straff" zu ziehen. Sollen die Zugkräfte gering bleiben, so müssen Leitungen und Seile verhältnismäßig weit durchhängen.
Auch dort, wo Seilgewicht *und* angehängte Last eine Rolle spielen (denken wir an Hängebrücken oder an Seilbahnen), weist die Zerlegung in Teilkräfte den Konstrukteuren den Weg.





Galgenähnliche Stützen wie auf unserer Zeichnung sind nicht selten. Wir finden sie bei Wandkränen an Hallen, an Masten von Straßenleuchten, als Halter der Fahrdrähte elektrischer Bahnen; sie tragen kleine Wandbretter, Balkone, Laufstege an Gerüsten oder Plattformen an Hochöfen, Gasometern, Tanks und anderen Industriebauten.

Wie wirkt sich die jeweilige Last auf Arm und schräge Strebe des Galgens aus? Wie wichtig die Antwort auf diese Frage ist, geht bereits aus den im vorigen Absatz genannten Beispielen hervor. Da wir schon etwas Erfahrung in der Kräftezerlegung haben, fällt es uns nicht schwer, die Lösung zu finden: Die Last zieht (oder drückt) zwar senkrecht nach unten, beansprucht aber dabei Arm und Strebe des Galgens. Sie bildet also die Diagonale eines Kräfteparallelogramms, dessen Seiten in die Richtungen der beiden Stützen fallen. Damit läßt sich die Zerlegung sofort ausführen.

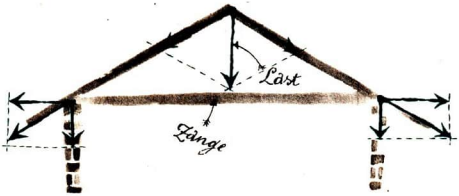
Der waagerechte Arm wird auf Zug beansprucht; die Last versucht, ihn aus der Wand herauszureißen – eine Erfahrung, die wir an den Haken eines zu stark belasteten Wandbrettes zu unserem Leidwesen selbst machen können. Die schräge Strebe dagegen wird auf Druck beansprucht. Die Last sucht sie in die Wand hineinzupressen. Diese Beanspruchung ist weit „ungefährlicher" als die Zugbeanspruchung des waagerechten Armes, da sich ein Körper leichter aus einer Wand herausreißen als hineindrücken läßt. Es ist daher ratsam, der schrägen Strebe die Hauptbeanspruchung zuzumuten. Das wird erreicht, indem der Winkel zwischen Arm und Strebe möglichst groß gemacht wird.

Die beiden Seiten einer Stehleiter sind stets durch eine feste Schnur oder durch einen Drahtbügel miteinander verbunden. Andernfalls würde die Leiter auseinanderrutschen, sobald jemand sie zu besteigen versucht.

Zwei miteinander verbundene Streben, die einer Unterlage aufsitzen, kommen auch im Bauwesen häufig vor, zum Beispiel bei Dächern. Untersucht man diese Anordnung „kräftemäßig", so muß man das Kräfteparallelogramm gleich mehrfach anwenden.

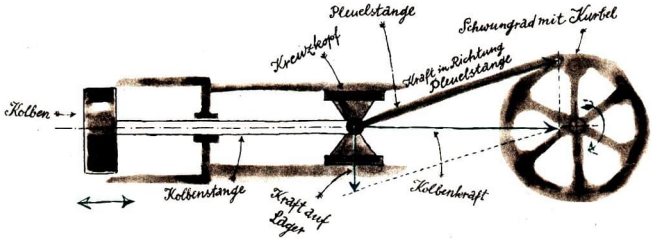
Denken wir uns eine Last an der Spitze befestigt, also dort, wo die Streben zusammenstoßen. Sie zieht nach unten und läßt sich sofort in zwei Teilkräfte zerlegen, die in Richtung der Streben wirken.

Diese Kräfte treten an den Auflagepunkten wieder in Erscheinung und rufen dort zweierlei Wirkung hervor: Sie drücken auf die Unterlage, und sie versuchen, die Streben



zur Seite zu schieben. Durch ein zweites Kräfteparallelogramm lassen sich auch diese Kräfte bestimmen.
Bei einem Dach wird die nach unten drückende Kraft leicht vom Mauerwerk aufgefangen. Gefährlicher ist die seitwärts gerichtete Komponente; denn sie sucht die Mauern nach außen zu kippen.
Man könnte die seitwärts wirkenden Kräfte durch außen angesetzte Schrägstützen auffangen (an alten Scheunen kann man sie mitunter beobachten). Einfacher ist es jedoch, das von der Stehleiter her bekannte Rezept anzuwenden: Man verbindet die Streben durch einen Querbalken, Zange genannt. Er fängt die Seitenkräfte auf und wird dabei auf Zug beansprucht.

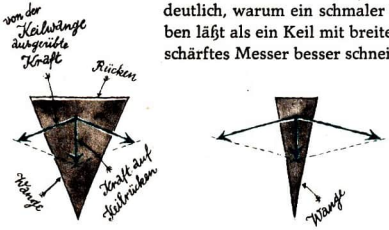
Solche Strebenkonstruktionen kehren in der Technik häufig wieder. Wir begegnen ihnen nicht nur bei Dachkonstruktionen, sondern auch an Brücken, Gittermasten und anderen Stahlkonstruktionen. Dabei sind die Kräfteverhältnisse oft viel verwickelter als in unserem Beispiel. Bereits bei einem einfachen Giebeldach wären Korrekturen anzubringen: Die Last hängt nicht an der Spitze, sondern verteilt sich längs der Schrägbalken. Es kommen außerdem zusätzliche, oft einseitige Beanspruchungen durch Wind oder Schnee hinzu. Dies und noch manchen anderen Umstand muß der Konstrukteur berücksichtigen. Doch so umfangreich und kompliziert seine Berechnungen auch sein mögen: Immer wieder taucht in ihnen das Kräfteparallelogramm auf.
Bei Verbrennungsmotoren und Dampfmaschinen muß die hin- und hergehende Kolbenbewegung in eine Drehbewegung verwandelt werden. Das übernimmt ein „Kurbeltrieb": Die Kolbenstange wird mit dem in einem Lager hin- und hergleitenden Kreuzkopf verbunden. An ihm sitzt in einem Gelenk die Pleuelstange, deren anderes Ende die Kurbel dreht. Ein Schwungrad sorgt für gleichmäßigen Lauf.



Die treibende Kraft wirkt stets in der Verlängerung der Kolbenstange. Im Kreuzkopf jedoch wird sie in zwei Teilkräfte zerlegt. Nützlich ist allein die in Richtung der Pleuelstange weisende Komponente, denn nur sie trägt zur Drehbewegung bei. Von den toten Punkten (s. S. 62) sehen wir vorerst ab. Die andere Teilkraft – senkrecht zur Kolbenbewegung – belastet das Gleitlager des Kreuzkopfes. Bei jeder Stellung der Kolbenstange hat das Verhältnis der beiden Teilkräfte einen anderen Wert. Infolgedessen pendelt auch die auf die Kurbel übertragene Kraft dauernd – ein nicht unwesentlicher Nachteil aller „Kolbenmaschinen".

Die Zerlegung einer Kraft in Komponenten praktizieren wir sogar, wenn wir ein Messer verwenden. Es läßt sich nämlich – gemeinsam mit sämtlichen trennenden und spanabhebenden Werkzeugen wie Meißel, Axt, Hobel, Stemmeisen, Fräser – auf den „Keil" zurückführen.

Wie ein Keil wirkt, ist bekannt: Schlagen oder drücken wir auf seinen Rücken, so treten an den Keilwangen seitwärts gerichtete Kräfte auf, die beispielsweise einen Holzklotz auseinandertreiben oder eine Scheibe vom Brot abtrennen. Die Skizze zeigt, wie diese Kräfte entstehen. Sie macht zugleich deutlich, warum ein schmaler Keil sich leichter in Holz treiben läßt als ein Keil mit breitem Rücken, und warum ein geschärftes Messer besser schneidet als ein stumpfes.



Zwischen Schneeschuh und Raupenschlepper

Wenn Sie Jack London gelesen haben, wissen Sie, daß Jäger im Norden des amerikanischen Kontinents sich während der Wintermonate für ihre Pirschgänge Schneereifen unter die Füße schnallen. Diese Schneereifen – richtiger „Rahmenschneeschuhe" – bestehen aus ovalen oder runden Holzrahmen, deren Inneres von zahlreichen, miteinander verflochtenen Streifen aus Karibuleder überspannt ist.

Rahmenschneeschuhe sollen verhindern, daß die Füße zu tief in den weichen Schnee einsinken. Es kommt nämlich, wenn eine Kraft auf einen nachgiebigen Stoff wirkt, nicht nur auf die Größe der Kraft, sondern auch auf die von ihr belastete Fläche an:

Ein Kilopondgewicht ist harmlos, wenn wir es auf der flachen Hand halten, so daß das Gewicht sich über eine größere Fläche verteilen kann. Es ist nicht mehr harmlos, wenn wir die belastete Fläche dadurch verkleinern, daß wir zwischen Hand und Gewicht eine Reißzwecke mit der Spitze nach unten schieben. Eine Kraft macht sich um so deutlicher bemerkbar, je kleiner die Fläche ist, auf die sie wirkt.

Diese Beobachtung hat Physiker und Techniker dazu veranlaßt, den Begriff „Druck" zu prägen. Man versteht darunter das Verhältnis aus senkrecht auf eine Fläche wirkender Kraft und der Größe dieser Fläche:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

$$p = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{F}} \quad \left[\frac{kp}{cm^2}\right]$$

In der Festlegung des Begriffes Druck wird von einer *senkrecht* auf die Fläche wirkenden Kraft gesprochen. Das ist verständlich; denn wirkt eine Kraft schräg auf eine Fläche, so „drückt" im eigentlichen Sinne des Wortes nur die zur Fläche senkrechte Kraftkomponente.

Beim Schreiben beispielsweise löst die Kraft, die wir auf den Halter oder Stift ausüben, eine Komponente aus, die senkrecht auf die Unterlage drückt, und eine, die seitwärts gerichtet ist. Diese läßt das Schreibwerkzeug rutschen, wenn wir auf harter Unterlage zu sehr aufdrücken. Als die Abc-Schützen noch auf Schiefertafeln schrieben, glitt der Griffel sehr oft aus; ältere Leser werden sich schaudernd des dabei entstehenden, „nervenzerreißenden" Geräusches erinnern.

In der Formel ist wieder angegeben, welche Einheiten wir für Druckmessungen verwenden können: Als Krafteinheit wählen wir das Kilopond, als Flächeneinheit den Quadratzentimeter. Ein Stahlzylinder von 10 kp Gewicht und 5 cm^2 Bodenfläche übt demnach auf seine Unterlage einen Druck von 2 kp/cm^2 aus, ein Kilopondgewicht mit einer Auflagefläche von nur 1 mm^2 (0,01 cm^2) einen Druck von 100 kp/cm^2. Eine Rasierklinge aber greift wegen der geringen „Fläche" ihrer Schneide die Bartstoppeln mit einem Druck von 10 000 kp/cm^2 an. Kein Wunder, daß bei den ersten Rasierversuchen Blut fließt . . .

Den Druck von 1 kp/cm^2 nennt man auch „1 technische Atmosphäre" (at), denn er entspricht ungefähr dem Druck, den die Lufthülle der Erde auf jeden Quadratzentimeter der Erdoberfläche in Meereshöhe ausübt. „Ungefähr" haben wir nicht nur geschrieben, weil der Luftdruck durch meteorologische Vorgänge ständig schwankt. In Wirklichkeit ist nämlich der mittlere Atmosphärendruck etwas größer als 1 at (vgl. S. 113). Daß man trotzdem den „falschen" Wert benutzt, erklärt sich daraus, daß der Fehler nur geringfügig ist und man nicht auf den Vorteil verzichten möchte, mit „glatten" Zahlen zu arbeiten.

Erlauben wir uns einen kleinen Seitensprung: Auch der menschliche Körper ist der Wirkung des Luftdruckes ausgesetzt. Er belastet jeden Quadratzentimeter unserer Körperoberfläche mit etwa 1 kp (1 at). Da die Oberfläche eines Erwachsenen ungefähr 1,5 m^2 beträgt, sind wir ständig einer Belastung von 15 000 kp ausgesetzt. Der Luftdruck würde uns zusammenquetschen, wenn in den Hohlräumen unseres Körpers nicht etwa gleicher Druck herrschte und dem Außendruck die Waage hielte.

Rasche Luftdruckänderungen gleicht der Körper allerdings nicht sofort aus: Im auf- oder absteigenden Flugzeug macht sich die Druckdifferenz als Ohrensausen oder als „Knacken" in den Ohren bemerkbar. Man kann den Druckausgleich durch Kaubewegungen beschleunigen; zu ihnen sollen uns die Bonbons anregen, die uns die Stewardeß vor dem Start und vor der Landung anbietet.

Soll ein nachgiebiger Stoff durch eine Kraft möglichst wenig in Mitleidenschaft gezogen werden, so muß man die belastete Fläche möglichst groß machen. Hier sei wieder die Reißzwecke genannt. Um sie in Holz zu treiben, ist eine nicht geringe Kraft erforderlich. Besäße die Zwecke keinen großen Kopf, so würde sie uns durch den auch an ihrem Oberende

auftretenden Druck verletzen. Wer es nicht glaubt, der versuche einmal, einen Nagel mit der bloßen Hand in ein Holzbrett zu drücken . . .

Unsere Füße bedecken eine Fläche von etwa 450 cm². Bei einem Gewicht von 75 kp übt also ein Erwachsener auf den Boden einen Druck von $\frac{75}{450}$ at, das heißt von 0,17 at aus. Das ist zwar wenig, kann aber nicht verhindern, daß man in weichem Untergrund einsinkt.

Im Schnee helfen auch uns Schneeschuhe weiter. Skier von 180 cm Länge vergrößern die Auflagefläche des Körpergewichtes auf etwa 4300 cm². Der Druck geht auf etwa ein Zehntel des obengenannten Wertes zurück.

Schnallen wir dagegen Schlittschuhe an, so übersteigt der Druck auf die Unterlage 2,5 kp/cm². So erklärt sich auch, daß unter Umständen ein Fußgänger ungefährdet eine Eisfläche betreten kann, während er sofort einbrechen würde, wenn er Schlittschuhe anschnallte. Daß man sich einem im Eise Eingebrochenen nur liegend nähert oder daß man Bretter, Leitern usw. unterschiebt, hat seinen Grund natürlich gleichfalls in dem Bestreben, die Druckbelastung der Eisfläche herabzusetzen.

Sollen sich Fahrzeuge in weichem oder sumpfigem Gelände bewegen, so legt man Knüppeldämme aus. Sie verteilen das Fahrzeuggewicht über eine große Fläche. Für Wüstenfahrten gelten breite „Sandbretter" als unentbehrliche Hilfsmittel; auch benutzt man dort Fahrzeuge mit großen, „weichen" Ballonreifen, die auf möglichst großer Fläche den Boden berühren.

Fahrzeuge für unwegsames Gelände legen sich ständig selbst eine druckvermindernde Unterlage vor die Räder, fahren darüber hinweg, heben sie wieder auf, legen sie erneut vor. Sie wissen natürlich, daß wir Raupenfahrzeuge meinen, die sich auch noch dort durchs Gelände bewegen, wo jedes andere Gefährt hoffnungslos versacken würde. Selbst ein großer Raupenschlepper belastet den Boden nur etwa doppelt so stark wie ein Fußgänger!

Von der Kunst des Balancierens

Seien Sie ehrlich! Auch Sie haben sich schon einmal vorgestellt, wie es wäre, wenn dem Kellner das mit Gläsern besetzte Tablett aus der Hand glitte und dem Pärchen am übernächsten Tisch . . . Doch es passiert gar nichts. Geschickt windet sich der Ober, seine Last mit der Linken in Schulterhöhe balancierend, zwischen Stühlen und Tischen hindurch.
Das Tablett fällt oder rutscht nicht, wenn es an der „richtigen" Stelle unterstützt wird. Zwar greift die Schwerkraft an jedem Bierglas, an jedem Stückchen des Tabletts, ja an jedem einzelnen Molekül an; doch die Kraftwirkungen, die das Tablett nach links oder nach hinten kippen wollen, sind bei richtiger Unterstützung ebenso groß wie die, die es nach vorn oder nach rechts zu ziehen suchen. Daher bleibt das Tablett in Ruhe. Es befindet sich im Gleichgewicht wie der Balken einer austarierten Waage.
Nur wenn man eine bestimmte Stelle unterstützt, bleibt das Tablett im Gleichgewicht. Diese Stelle (im Idealfall ein Punkt, in unserem Beispiel eine kleine Fläche) ist der „Schwerpunkt" des Tabletts. In ihm kann man sich das gesamte Gewicht des Tabletts vereinigt denken; das übrige Tablett können wir uns „gewichtslos" vorstellen.
Nicht nur ein Tablett, sondern alle Körper besitzen einen Schwerpunkt. Sind sie regelmäßig geometrisch geformt, so läßt sich dessen Lage leicht bestimmen oder errechnen. Daß wir eine quadratische Pappscheibe balancieren können, wenn wir sie im Schnittpunkt ihrer Diagonalen unterstützen, weiß jeder; Diagonalenschnittpunkt und Schwerpunkt decken sich. Daß eine Kugel im Gleichgewicht ist, wenn man sie im Mittelpunkt unterstützt, bedarf keiner Erörterung. Kugelmittelpunkt und Kugelschwerpunkt fallen demnach zusammen; das gilt auch für Hohlkugeln, wobei wir gleichzeitig erkennen, daß der Schwerpunkt auch außerhalb des Stoffes liegen kann, der den Körper bildet.
Bei einem Rad haben wir den Schwerpunkt in der Mitte der Radachse zu suchen. Ist es allerdings ungenau gearbeitet und nicht sorgfältig „ausgewuchtet", so liegt der Schwerpunkt neben der Achse. Das Rad schlägt, eine Erscheinung, die überall in der Technik sehr unbeliebt ist.
Den Konstrukteuren hilft der Begriff des Schwerpunktes wesentlich bei ihren Berechnungen. Sehr oft brauchen sie die an den verschiedenen Teilen eines Körpers angreifenden Schwerkräfte nicht einzeln zu berücksichtigen; sondern kön-

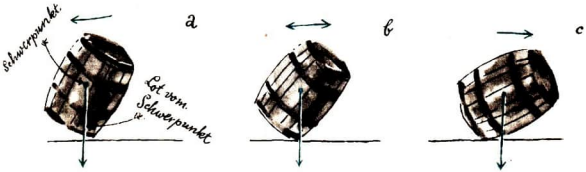
nen sie durch das im Schwerpunkt konzentriert gedachte Gesamtgewicht ersetzen. An die Stelle zahlreicher Kraftpfeile tritt der Kraftpfeil des Gesamtgewichtes. Wir haben diese Vereinfachung ebenfalls schon angewandt, zum Beispiel bei dem Radfahrer in der Abbildung auf S. 22.

Sind Sie schon einmal mit dem Stuhl umgekippt? Als Kind sicher, denn da zählt es zu den verbreitetsten kleinen Sünden, zu „kippeln" (es soll reife Männer geben, die mitunter noch diesem Spielchen frönen). Zunächst wird nur ein klein wenig geschaukelt; und immer wieder kehrt der Stuhl in seine Ruhelage zurück. Auf einmal aber stürzt er mit lautem Poltern um.

Es gibt noch mehr Dinge in unserer Wohnung, die leicht umfallen: Stehlampen mit kleinem Fuß, Weihnachtsbäume auf zu schmalem Ständer oder jene altmodischen, dreibeinigen Tischchen, die wir irgendwann einmal erbten, ohne bislang den Mut aufzubringen, sie zu verheizen.

Wann fällt eigentlich ein Gegenstand um? Manchmal genügt dazu ein leichter Stoß; andere Dinge wieder müssen wir tüchtig anheben, damit sie umkippen.

Merken wir uns die einfache Regel: Ein Körper kippt um, wenn das Lot vom Schwerpunkt aus nicht mehr in die Unterstützungsfläche fällt. Folgende Skizze soll das illustrieren: In a wurde das Faß einseitig angehoben, aber das Lot vom Schwerpunkt geht noch durch die ehemalige Auflagefläche; lassen wir los, so fällt das Faß in seine Ausgangsstellung zurück. Ein Grenzfall ist b: Der leiseste Stoß genügt, um das Faß nach rechts oder links kippen zu lassen. In c liegt das Lot außerhalb der Unterstützungsfläche; das Faß stürzt um, sobald wir es loslassen.



Die Abbildung auf S. 34 zeigt, wie man die Standfestigkeit eines Körpers erhöhen kann. Die Unterstützungsfläche muß möglichst groß sein, der Schwerpunkt möglichst tief liegen. Dabei verstehen wir unter der Unterstützungsfläche die von

den Unterstützungspunkten begrenzte Fläche – bei einem Tisch zum Beispiel die Fläche zwischen den Beinen.

Für die Technik ist das Problem der Standfestigkeit von großer Bedeutung. Fahrzeuge werden so konstruiert, daß ihr Schwerpunkt möglichst tief liegt. Auch bei schräger Lage kippen sie dann nicht so leicht. Schiffe kentern um so schwerer, je tiefer ihr Schwerpunkt liegt. Fahrbare Kräne haben einen besonders massiven Unterbau, damit sie nicht durch die hängende Last umgeworfen werden; oft setzt man zusätzliche Stützen zur Vergrößerung der Unterstützungsfläche an. Werkzeugmaschinen ruhen auf einem weit ausladenden, schweren Fuß. Er vergrößert die Unterstützungsfläche und senkt den Schwerpunkt. Wer sich im Betrieb, auf der Straße und zu Hause umsieht, wird die Verwirklichung des Grundsatzes „Schwerpunkt tief – Auflagefläche groß" immer wieder entdecken können.

Ein frei beweglicher Körper stellt sich stets so ein, daß sein Schwerpunkt so tief wie möglich liegt. Eine Kugel rollt, in eine Mulde gesetzt, einige Male hin und her und kommt an der tiefsten Stelle zur Ruhe. Sie ist dort im „stabilen Gleichgewicht"; es ist dadurch gekennzeichnet, daß der Schwerpunkt der Kugel sich bei jeder Bewegung heben würde. Die Kugel kehrte, nach dem Heben sich selbst überlassen, immer wieder in ihre tiefste Lage zurück.

Auf einer ebenen Fläche bleibt eine Kugel in jeder Stellung liegen. Ihr Schwerpunkt ändert seine Höhe nicht, wenn die Kugel rollt. Sie befindet sich im „indifferenten Gleichgewicht".

Endlich gibt es noch „labiles Gleichgewicht". Es wäre hergestellt, wenn es uns gelänge, eine kleine Kugel auf die höchste Stelle einer anderen zu legen. Wir brauchen viel Geduld für diesen Versuch. Sollte er überhaupt gelingen, so nur für einen Augenblick. Die leiseste Erschütterung reicht aus, um die Kugel herunterrollen zu lassen. Charakteristisch für das labile Gleichgewicht ist, daß sich der Schwerpunkt des Körpers bei jeder Bewegung senkt.

Öfter, als man annehmen sollte, haben wir uns mit dem labilen Gleichgewicht auseinanderzusetzen: Wenn wir radfahren, befinden wir uns auf gerader Strecke ständig im labilen Gleichgewicht – genauer: Wir stellen es fortwährend von neuem her. Das geschieht, indem wir durch unbewußte Körperbewegungen und winzige Bögen immer wieder dafür sorgen, daß unser Schwerpunkt genau über der Verbindungslinie zwischen den Aufsetzpunkten der Räder liegt. Radfahren ist, so könnte man fast sagen, nichts anderes als fortdauerndes „eben noch verhindertes" Umkippen.

Noch deutlicher macht sich das labile Gleichgewicht bemerkbar, wenn wir jonglieren. Balancieren wir einen Stock aufrecht auf der Fingerspitze, so gibt es niemals Ruhe: Sobald der Stock zu kippen beginnt, „unterlaufen" wir ihn mit der Hand, so daß der Schwerpunkt wieder genau über der Fingerspitze liegt. Meistens tun wir dabei unwillkürlich etwas zuviel des Guten, und durch eine geringfügige Korrekturbewegung in Gegenrichtung muß ein Umfallen nach der anderen Seite verhindert werden. So geht es ständig weiter, und es ist erstaunlich, wie schnell wir lernen, die Korrekturen fast unbewußt auszuführen.

Der Akrobat auf dem Drahtseil verfährt ebenso: Mit ausgestreckten Armen oder einer Balancierstange korrigiert er fortwährend die Lage seines Schwerpunktes so, daß dieser über dem Seil liegt.

Und wieder Archimedes

Kaum ein physikalisches Gerät wird in der Technik und im täglichen Leben so oft angewandt wie der Hebel; keine physikalische Beziehung ist so populär wie das Hebelgesetz. Diese Popularität geht auf keinen geringeren zurück als auf jenen Archimedes, dem wir begegneten, als er unbekleidet durch die Straßen von Syrakus rannte.

Man darf Archimedes mit Fug und Recht als den ersten Ingenieur bezeichnen, der den bereits lange vorher bekannten Hebel nicht nur immer wieder anwandte, sondern seine Gesetze auch rechnerisch untersuchte und ausnutzte. Archimedes' Mitbürger hätten uns mancherlei darüber berichten können:

Einst baute man in Syrakus ein großes Schiff. Als es von Stapel gelassen werden sollte, stellte es sich heraus, daß es

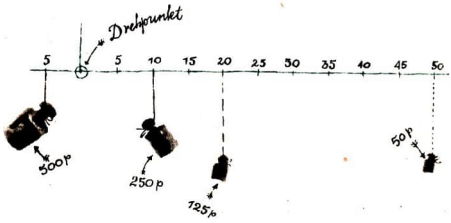
zu schwer geworden war, um bewegt werden zu können. Archimedes wußte Rat: Aus Hebeln und Rollen konstruierte er eine Vorrichtung, die es wenigen Menschen ermöglichte, das Schiff nicht nur zu Wasser zu lassen, sondern auch wieder aufs Trockene zu ziehen.

Die römischen Belagerer von Syrakus wußten gleichfalls ein Lied von der Erfindungskunst des Archimedes zu singen, und das, noch ehe sie in die Stadt eindringen konnten. Archimedes hatte das Hebelgesetz benutzt, um Schleudern und andere Kriegsmaschinen zu bauen, die große Lücken in die Reihen der Angreifer rissen.

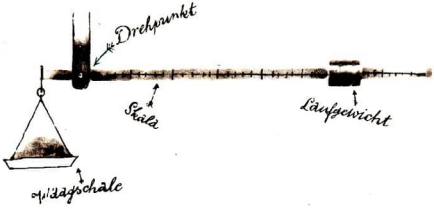
Was der Physiker Hebel nennt, begegnet uns bereits an jeder alten Waage. Ihr wichtigster Teil ist der Waagebalken. Er ist in der Mitte drehbar gelagert, und der Drehpunkt teilt den Waagebalken in zwei Hälften, die Arme der Waage. Am Ende jedes Armes hängt eine Waagschale. Gleichgewicht herrscht, wenn in beiden Waagschalen Körper gleichen Gewichts (beziehungsweise gleicher Masse) liegen und wenn beide Schalen gleich weit vom Drehpunkt entfernt hängen. Schieben wir eine Waagschale nach innen, zum Drehpunkt, so geht der zugehörige Arm in die Höhe. Rücken wir hingegen die Waagschale nach außen, vom Drehpunkt weg, so senkt sich der Waagebalken nach dieser Seite. Es kommt also nicht nur auf die Last, sondern auch auf ihren Abstand vom Drehpunkt an.

Betrachten wir die unten skizzierte Waage! Ihre Arme sind so gewählt, daß der rechte zehnmal so lang ist wie der linke. Wir wollen außerdem annehmen, daß der Waagebalken selbst kein Gewicht besitzt oder, was hier auf dasselbe herauskommt, so konstruiert ist, daß er für sich allein im Gleichgewicht wäre.

Hängen wir an die linke Seite – 5 cm vom Drehpunkt entfernt – ein Gewicht von 500 p. Wir können ihm Gleichgewicht



halten, indem wir an den rechten Arm ein 500-p-Gewicht hängen, das ebenfalls 5 cm vom Drehpunkt entfernt sein müßte.
Wir können jedoch auf der rechten Seite mit einem viel geringeren Gewicht auskommen. Hängen wir an den rechten Waagearm ein 250-p-Gewicht in 10 cm Entfernung vom Drehpunkt, so herrscht wieder Gleichgewicht. Ebenso ist es, wenn wir 20 cm vom Drehpunkt entfernt ein Gewicht von 125 p anhängen. Am Ende des Armes brauchen wir sogar nur noch 50 p, um den 500 p auf der anderen Seite die Waage zu halten. Wir erkennen, daß kleine Gewichte vielfach größere ausbalancieren können.
Bei der „Schnellwaage" nutzt man das aus. Auf ihrem rechten Arm läßt sich ein unveränderliches „Laufgewicht" verschieben. Sein Abstand vom Drehpunkt ist ein Maß für die auf der anderen Seite hängende Last.



Um den zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen Gewicht und Entfernung vom Drehpunkt herauszubekommen, betrachten wir die nachstehende Zusammenstellung:

Entfernung:	5	10	20	25	30	50	cm
Gewicht:	500	250	125	100	83,3	50	p

Stets ergeben die untereinander stehenden Zahlen das Produkt 2500. Dieses Produkt taucht auch auf der linken Seite des Waagebalkens auf, dort, wo in 5 cm Entfernung vom Drehpunkt das 500-p-Gewicht angebracht ist.
Würden wir den Versuch mit beliebigen Gewichten und Entfernungen wiederholen, so könnten wir leicht feststellen, daß an der Waage stets dann Gleichgewicht besteht, wenn die Produkte aus Entfernung und Gewicht sich für die rechte und die linke Seite gleichen. Nennen wir den Abstand des auszubalancierenden Gewichtes vom Drehpunkt „Lastarm", den Abstand des Gegengewichtes vom Drehpunkt „Kraftarm",

bezeichnen wir ferner die zugehörigen Gewichte als „Last" und „Kraft", so können wir das Hebelgesetz sofort niederschreiben:

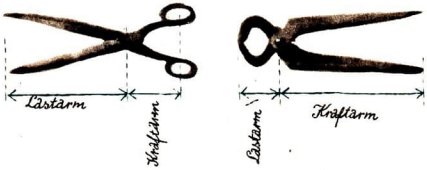
Am Hebel herrscht Gleichgewicht, wenn die Bedingung erfüllt ist:

Kraft mal Kraftarm gleich Last mal Lastarm.

Hierbei müssen selbstverständlich die Kräfte in gleichen und die Entfernungen ebenfalls in gleichen Einheiten gemessen werden. Der Ausdruck „Gewicht" kommt in unserer Formulierung nicht mehr vor; denn das Gesetz gilt nicht nur für die Kraft „Gewicht", sondern für jede Kraft.

Durch entsprechende Bemessung der Hebelarme kann man mit sehr kleinen Kräften große und größte Kräfte ausüben; die Möglichkeit, sie zu berechnen, verdanken wir dem Hebelgesetz.

Anwendungen des Hebels gibt es in Hülle und Fülle. Eine davon können Sie wahrscheinlich bereits am Eingang Ihres Betriebes beobachten. Die Schranke, die Fahrzeugen eine unkontrollierte Ein- und Ausfahrt verwehrt, ist ein zweiseitiger Hebel. Um das Gewicht der langen Schranke auszugleichen, wird sie über den Drehpunkt hinaus verlängert; die Verlängerung trägt ein Gegengewicht, das dem langen Schrankenarm die Waage hält. Dadurch läßt sich die Schranke ohne großen Kraftaufwand bewegen, und es besteht auch nicht die Gefahr, daß sie von allein wieder zufällt.

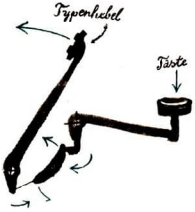


In Scheren und Zangen ist ebenfalls leicht der zweiseitige Hebel wiederzuerkennen: Die Schneidkraft einer Schere oder einer Zange ist in der Nähe des Drehpunktes am größten; die Arme von Geflügel- oder Gartenscheren sind im Verhältnis zu den als „Lastarm" dienenden Schneiden lang, damit man eine große Kraft ausüben kann. Allerdings ist es dazu nötig, diese Werkzeuge tatsächlich am Ende des Kraftarmes anzufassen.

Daß die Wippe auf dem Spielplatz ebenfalls ein zweiseitiger Hebel ist, wissen Kinder zwar noch nicht; aber unbewußt wählen sie ihren Sitzplatz so, daß an diesem Hebel ungefähr Gleichgewicht herrscht.

Die Handbremse des Fahrrades ist ein zweiseitiger Hebel; Büchsen- und Flaschenöffner beruhen gleichfalls oft auf dem Hebelgesetz.

Übrigens kann ein Hebel auch „um die Ecke" gehen, und solche Winkelhebel finden wir im Maschinenbau sogar besonders häufig. Eine Fundgrube dafür sind Schreibmaschinen: An ihren Tasten wirken jeweils gleich mehrere Hebel zusammen. Unsere Abbildung zeigt ein Beispiel aus einer Vielzahl von Möglichkeiten.



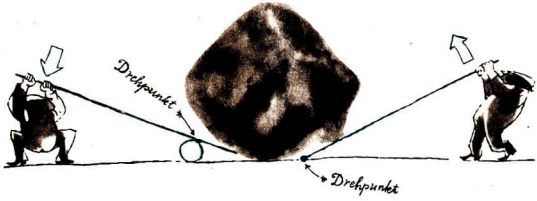
Typenhebel einer Schreibmaschine

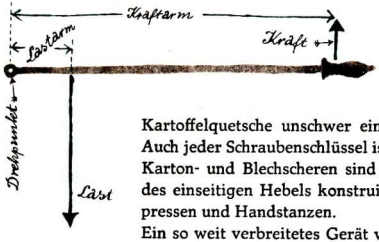
Auch der Hebebaum oder die Brechstange ist ein Hebel. Er ist für uns deswegen interessant, weil er sich auf zweierlei Weise anwenden läßt. Setzen wir ihn so an wie auf der Abbildung unten links, so haben wir es fraglos mit einem zweiseitigen Hebel zu tun. Anders wird es, wenn wir ohne dazwischengeschobene „Stütze" arbeiten. Aus der Abbildung unten rechts läßt sich beim besten Willen kein zweiseitiger Hebel herauslesen; denn der Drehpunkt liegt hier am Hebelende, und Kraft und Last greifen infolgedessen – vom Drehpunkt aus gesehen – an der gleichen Seite an.

Trotzdem stellt der Hebebaum auch jetzt einen Hebel dar, allerdings einen „einseitigen" Hebel. Er ist dadurch gekennzeichnet, daß sein Drehpunkt am Ende liegt, daß also Kraft- und Lastarm nach der gleichen Seite weisen.

Auch für den einseitigen Hebel gilt das Hebelgesetz. Ein Beispiel ist auf S. 40 oben noch einmal skizziert. Es bedarf keiner Erläuterung. Wichtig ist nur, daß Kraft- und Lastarm beim einseitigen Hebel stets vom Drehpunkt aus gemessen werden; es zählt also nicht etwa ein Stück des Hebels nur als Kraftarm, das andere nur als Lastarm.

An Anwendungen des einseitigen Hebels ist ebenfalls kein Mangel. Im Haushalt zum Beispiel sind in Nußknacker und



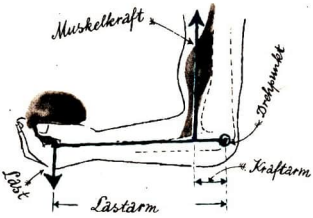


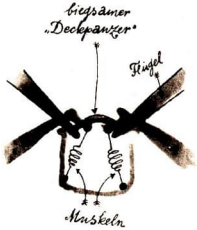
Kartoffelquetsche unschwer einseitige Hebel zu erkennen. Auch jeder Schraubenschlüssel ist ein einseitiger Hebel. Karton- und Blechscheren sind ebenfalls nach dem Prinzip des einseitigen Hebels konstruiert. Gleiches gilt für Hebelpressen und Handstanzen.

Ein so weit verbreitetes Gerät wie die Schubkarre ist nichts als ein „fahrbarer" einseitiger Hebel mit dem Drehpunkt in der Radachse; deshalb schiebt sich eine Karre auch um so leichter, je weiter vorn die Last liegt.

Vergessen wir nicht uns selbst! Im menschlichen und tierischen Körper ist der einseitige Hebel immer wieder vertreten: in den Unterarmen, in den Kniegelenken, im Kiefer.

Auch Insekten- und Vogelflügel sind einseitige Hebel. Bei ihnen wie auch bei den tierischen und menschlichen Muskeln fällt auf, daß der Lastarm länger als der Kraftarm ist. Das scheint widersinnig, denn so wird ja keine Kraft gespart, sondern „zugesetzt": Um ein Gewicht in der Hand zu halten, muß der Unterarmmuskel das Mehrfache an Kraft aufbringen. Dafür aber braucht er nur geringfügig verkürzt zu werden, wenn das Gewicht um eine größere Strecke gehoben werden soll.





Unterarmmuskel als Wurfhebel (links)
Insektenflügel und ihr Hebelsystem (rechts)

Wir lernen hier eine weitere Eigenschaft des Hebels kennen: Er kann Kräfte vergrößern, aber auch Bewegungen. Treten wir auf die kurzen Zinken eines falsch liegenden Rechens, so schnellt der Stiel empor; bei der Schreibmaschine genügt ein geringfügiges Niederdrücken einer Taste, um den Typenhebel anschlagen zu lassen.

Man nennt Hebel, bei denen es weniger auf eine Krafteinsparung, sondern vielmehr auf die Vergrößerung einer Bewegung ankommt, Wurfhebel. Sie sind überall da am Platze, wo durch einen kleinen Anstoß eine weit ausholende, schnelle Bewegung erreicht werden soll. Das ist bei den Flügeln der Tiere der Fall, die ja einen bestimmten „Hub" aufweisen müssen; das gilt für unsere Glieder, die schnell und weitreichend bewegt werden müssen. Auch Tennis- oder Federballschläger sind – zusammen mit dem Arm – „Wurfhebel".

Parade der Rollen

Die knarrende, quietschende Rolle, über die ein Seil zum Emporwinden des Eimers läuft, verrichtet noch heute an alten Brunnen ihren Dienst. Ähnliche Rollen gibt es in Materiallägern, auf Baustellen und an Speichern. Stets werden sie benutzt, um Lasten, sei es nun ein Wassereimer, ein Getreide- oder Zementsack, zu heben.

Die wichtigste Eigenschaft einer solchen Rolle ist unschwer zu erkennen: Wir können mit ihrer Hilfe einer Kraft eine andere Richtung geben. Um eine Last zu heben, ist eine senkrecht nach oben wirkende Kraft notwendig. Mit Seil und Rolle läßt sie sich durch eine senkrecht oder schräg zum Boden gerichtete Kraft ersetzen. Kraft wird bei diesem Einsatz einer Rolle nicht gespart; denn wir können uns die Rolle als Hebel mit gleichlangen Armen vorstellen.

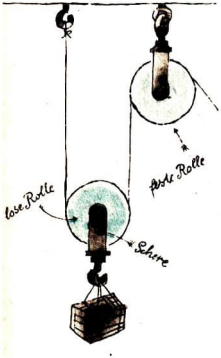
Warum greift man dann so häufig zur Rolle, wenn es gilt, Lasten nach oben zu befördern? Der Hauptgrund ist, daß es uns leichter fällt, eine Last mit Seil und Rolle vom Erdboden aus hochzuziehen, als wenn wir sie, an der Bodenluke stehend, unmittelbar hochheben müßten. Auf dem Erdboden erwächst uns nämlich ein wichtiger Helfer: Wir können unser Eigengewicht mit in die Waagschale werfen – und das ist beinahe wörtlich zu verstehen. Ist die zu hebende Last leicht, so brauchen wir nichts zu tun, als uns an das andere Seilende zu hängen; den Rest besorgt die Schwerkraft. Damit sehen wir aber auch die Grenze dieses Hebeverfahrens: Niemand kann auf diese Weise eine Last heben, deren Gewicht sein Körpergewicht übertrifft. Selbst ein 75 kp schwerer Athlet könnte nur weniger als 75 kp heben; bei einer größeren Last würde er allenfalls am Seil emporklettern, die Last dagegen untenbleiben.

Der Physiker nennt solche Rollen „fest" und drückt damit aus, daß die Rolle während der Krafteinwirkung an Ort und Stelle bleibt. Mit festen Rollen lassen sich also Kräfte umlenken, aber nicht sparen.

Am Vorderende eines Kranauslegers ist meistens eine feste Rolle vorgesehen. An Weichen und Bahnschranken, die mechanisch, das heißt durch Drahtzug, betätigt werden, sind häufig feste Rollen zu erkennen.

Hängen an einer festen Rolle hüben und drüben gleiche Gewichte, so bleiben sie, wenn das Seilgewicht im Vergleich zu ihnen sehr klein ist, in jeder Stellung stehen. Auch das wird in der Technik ausgenutzt. Man kann die Kraft, die zum Antrieb eines Fahrstuhls notwendig ist, erheblich herabsetzen, wenn man beim Aufsteigen des Fahrstuhls gleichzeitig über eine Rolle Gegengewichte (oder eine zweite Kabine) sinken läßt. Der Antriebsmotor muß dabei nur noch die Reibung und die unvermeidlichen Gewichtsdifferenzen ausgleichen. Auch in Schiffshebewerken werden häufig Gegengewichte verwendet, um Lasten von Tausenden Tonnen durch verhältnismäßig schwache Motoren auf- und abbewegen zu können.

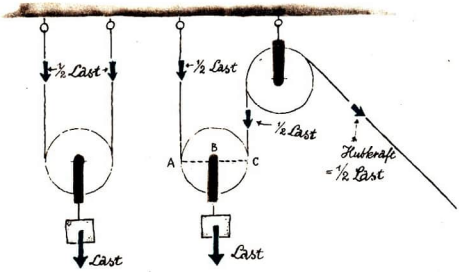
Es gibt sogar feste „Rollen", die eigentlich gar keine Rollen sind. Man kann ein Zugseil nämlich auch über eine feststehende, gerundete und möglichst glatte Unterlage führen. Trotz der erheblichen Reibung ist diese Art der Kraftumlenkung noch üblich. Eine Ausführung solcher „nichtrollender Rollen" gab es früher über jedem Wohnzimmerfenster: Porzellanringe, durch die man die zum Auf- und Zuziehen der Gardinen notwendigen Schnuren führte.



Soll mit einer Rolle Kraft gespart werden, so muß man zur „losen Rolle" greifen. Ihr Name rührt daher, daß sie bei Krafteinwirkung nicht an Ort und Stelle bleibt.

Beginnen wir wieder mit dem Heben einer Last. Sie hängt an der „Schere" einer losen Rolle. Die feste Rolle lenkt die aufzuwendende Kraft in eine uns angenehme Richtung um.

Nehmen wir an, die lose Rolle sei im Vergleich zur Last so leicht, daß wir ihr Gewicht unbeachtet lassen können. Wir würden feststellen, daß nur noch die halbe Kraft notwendig ist, um die Last in der Schwebe zu halten. Einem Gewicht von 100 kp an der losen Rolle würde durch 50 kp am rechten Seilende die Waage gehalten.



Die Erklärung ist sehr einfach: Ändern wir die Vorrichtung wie auf dem linken Bild, so trägt jede Seilhälfte das halbe Gewicht. Dieses halbe Gewicht zöge auch an unserer Hand, wenn wir den rechten Haken durch sie ersetzten. Es zieht auch an der festen Rolle; am rechten Seilende braucht als Ausgleich nur eine der halben Last gleiche Kraft aufgewendet zu werden.

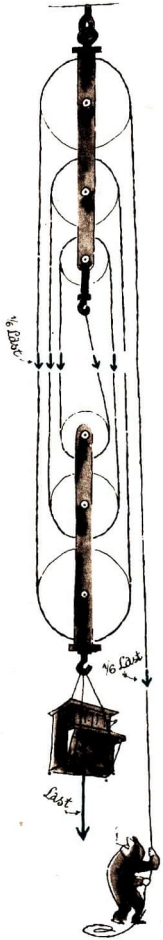
Die lose Rolle läßt sich auch als einseitiger Hebel auffassen. Sein Drehpunkt *A* liegt links an der Rolle, denn um diesen Punkt wandert die Rolle beim Heben nach oben. Die Kraft greift am rechten Hebelende an, die Last hängt in der Mitte. Da der Kraftarm *AC* doppelt so lang wie der Lastarm *AB* ist, genügt die halbe Kraft, um der Last das Gleichgewicht zu halten.

Wir haben zwar Kraft gespart, doch um die Last 1 m zu heben, müssen wir das Doppelte, also 2 m, an Seil herausziehen; was wir an Kraft sparen, setzen wir an Weg zu. Damit die Last um 1 m steigt, sind *beide* die lose Rolle tragenden Seilenden um je 1 m zu verkürzen – und das gibt zusammen 2 m.

Lose Rollen sind an vielen Hebe- und Spanneinrichtungen vorgesehen. Sie werden häufig mit Kranhaken zusammengebaut oder zum leichteren Heben von Fahrstuhlkabinen benutzt.

Auf Schiffen dienen sie in der verkümmerten Form der „Blöcke" zum Spannen der Takelage; zusammen mit festen Rollen und schweren Gegengewichten halten sie das Oberleitungsnetz elektrifizierter Bahnstrecken gespannt.

Der Campingfreund stolpert bisweilen sogar über lose Rollen, denn die Spanneinrichtungen mancher Zelte beruhen auf ihrem Prinzip.



Der Gedanke lag nahe, durch Verwendung mehrerer loser Rollen den Kraftaufwand weiter zu senken. Schon zu Archimedes' Zeiten gab es „Flaschenzüge", in denen dieser Gedanke verwirklicht war.

Zunächst sei gesagt, daß der Name „Flaschenzug" davon herrührt, daß die zur Befestigung seiner Rollen dienenden Gabeln ganz entfernt dem Längsschnitt einer Flasche ähnlich sehen.

Der dargestellte Flaschenzug enthält drei feste (obere Flasche) und drei lose Rollen (untere Flasche). Am rechten Seilende ist (einen „gewichtslosen" Flaschenzug vorausgesetzt) $^1/_6$ der Last als Hubkraft aufzuwenden. Stellen wir uns nämlich die ganze Vorrichtung „fest" vor, so entfällt auf jedes Seil zwischen den Rollen $^1/_6$ der Last, und nur einem dieser Sechstel müssen wir über die oberste Rolle die Waage halten. Bei vier Rollen wäre $^1/_4$ Last als Ausgleichskraft nötig, bei acht Rollen nur $^1/_8$.

Man setzt heute die Rollen jeder Flasche allerdings meistens nebeneinander auf eine gemeinsame Achse. Dadurch wird der Flaschenzug kürzer und einfacher.

In Wirklichkeit ist die aufzuwendende Kraft etwas größer, als sich aus der Rollenzahl ergeben würde. Einmal muß die untere Flasche mitgehoben werden, zum anderen treten Reibungsverluste auf, die mit wachsender Rollenzahl zunehmen.

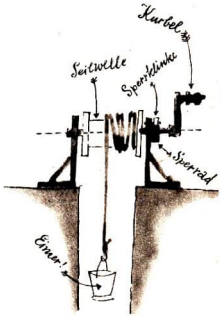
Auch für den Flaschenzug gilt die Regel: Was an Kraft gespart wird, muß an Weg zugesetzt werden. Soll im Bild die Last um 1 m gehoben werden, so sind 6 Seilstücke um je 1 m zu verkürzen: Wir müssen 6 m Seil aus dem Flaschenzug herausziehen.

Unsere schon zweimal zitierte Regel wird uns noch des öfteren begegnen. Wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung nennt man sie die „goldene Regel der Mechanik". Sie spiegelt, wie wir bald erfahren werden, eines der wichtigsten und umfassendsten Naturgesetze wider.

Das Hebelgesetz reicht weiter!

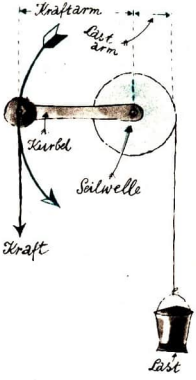
Sicher sind auch Sie heute, gestern oder vorgestern neugierig an der Stelle stehengeblieben, wo die Straße gesperrt und das Pflaster aufgerissen wurde. Was in der tiefen Grube vor sich geht, läßt sich vom Bürgersteig aus nicht feststellen; nur

Kübel voll Schlamm und Steine kommen ans Tageslicht. Zwei Arbeiter holen sie mit einer Seilwinde herauf. Sie nahmen es zur Kenntnis, hatten es 100 m weiter vergessen und haben sich gewiß nicht überlegt, daß auch die Seilwinde eine Anwendung des Hebelgesetzes darstellt. Nun, das können wir nachholen.



Sehen Sie sich die Zeichnung mit der Winde noch einmal an. Den größten Teil ihrer Achse nimmt die Seilwelle ein, auf die das aus der Grube aufsteigende Seil gewickelt wird. Ein zwischen Seiltrommel und Kurbel sitzendes, gezähntes Rad verhindert zusammen mit der in die Zähne eingreifenden, federnden Sperrklinke, daß die Last wieder nach unten sinkt, wenn die Kurbel losgelassen wird. Sie bleibt beim Aufwinden in jeder Stellung stehen; zum Niederlassen des Eimers muß die Sperrklinke zurückgeklappt werden.

Die Winde wird mit einer Handkurbel gedreht. Ihr Arm ist verhältnismäßig lang – so lang, daß beim Drehen schon der ganze Körper „mitmachen" muß. Das scheint auf den ersten Blick recht unpraktisch, doch in der Armlänge liegt gerade der „Kniff" der Seilwinde. Je länger der Kurbelarm, mit desto weniger Kraftaufwand läßt sich eine Last hochwinden.



Der letzte Satz erinnert recht deutlich an das Hebelgesetz; alles andere können wir aus dem Bild ablesen: Lastarm ist der Halbmesser der Seilwelle; Kraftarm ist der Kurbelarm. Ist er fünfmal länger als der Wellenradius, so müssen die Muskeln nur $^1/_5$ des zu hebenden Gewichtes aufbringen; ist er sechsmal so lang, nur $^1/_6$. „Kraft wird auf Kosten des Weges gespart" – diese Regel gilt auch für die Winde: Der große Kreis, den die zupackenden Hände beschreiben müssen, beweist es.

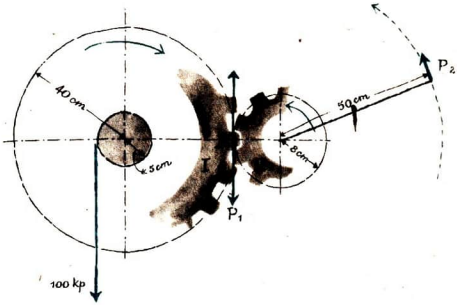
Die Familie der Kurbeln ist groß und in der Technik weit verbreitet. Wir treffen ihre Mitglieder an Kaffeemühlen und anderen Küchenmaschinen. Wir spannen mit ihrer Hilfe Werkstücke im Schraubstock oder in Maschinen fest. Wir holen mit grimmigem Gesicht eine Kurbel hervor, wenn der Motor unseres Kraftwagens nicht anspringen will. Wir kennen Kurbeln als unentbehrliche Bestandteile aller Motoren und Maschinen, in denen eine hin- und hergehende Bewegung in eine Drehbewegung verwandelt werden soll.

Auch das Lenkrad eines Kraftwagens und alle anderen Handräder sind eigentlich Kurbeln. Mitunter finden wir sogar die Kombination Handrad–Kurbelgriff. Sehen Sie sich daraufhin einmal die Lenksäule einer Straßenwalze oder die Richteinrichtung von Geschützen an.

So verschieden Formen, Ausführung und Aufgaben einer Kurbel oder eines Handrades auch sind: Stets vertritt die Kurbel den Kraftarm eines Hebels.

Wenn viel Kraft gespart werden soll, kommt man mit der einfachen Kurbel nicht immer zum Ziel. Wollten wir etwa die Kraft an der Kurbel auf $^1/_{100}$ des Gewichts senken, so müßte der Kurbelarm 100mal so lang sein wie der Halbmesser der Seilwelle. Beliebig dünn läßt sich die Welle aber nicht machen. Sie würde sich unter der Last durchbiegen. Ein Trommelradius von 2 cm (das wäre schon recht wenig) aber würde bei hundertfacher Kraftuntersetzung bereits einen Kurbelarm von 2 m Länge bedingen. Wer sollte ein solches Monstrum bedienen?

Man kann aber mit einer kürzeren Kurbel zum Ziel kommen, wenn man das Hebelgesetz mehrmals nacheinander anwendet. Dies geschieht mit Hilfe eines Zahnradgetriebes, das zwischen Seiltrommel und Kurbel geschaltet wird.



Untersuchen wir als Beispiel das gezeichnete Getriebe, in das die Radien der Zahnräder, der Seiltrommel und der Kurbel gleich eingetragen wurden. Der Einfachheit halber hänge eine Last von gerade 100 kp an der Seiltrommel. Um die am Kurbelgriff notwendige Kraft P_2 herauszubekommen, gehen wir schrittweise vor.

Wir berechnen zunächst die Kraft, die am Umfange des Rades I aufgewendet werden muß, um der Last das Gleichgewicht zu halten. Sie ergibt sich aus dem Hebelgesetz.

$$40 \cdot P_1 = 5 \cdot 100$$
$$P_1 = 12{,}5 \text{ [kp]}$$

Dieser Kraft P_1 wird nun nicht durch die an einer Kurbel angreifende Muskelkraft die Waage gehalten, sondern zu-

nächst durch die Zähne des Rades II. Die Kraftübertragung erfolgt in X, an der Stelle, wo die beiden Räder ineinandergreifen. Das Hebelgesetz läßt sich noch einmal anwenden.

$$50 \cdot P_2 = 12{,}5 \cdot 8$$
$$P_2 = 2\,[kp]$$

Durch das Zwischenschalten des Getriebes wurde also die aufzuwendende Kraft auf ein Fünfzigstel gesenkt! Um das gleiche Resultat mit der einfachen Kurbel zu erreichen, wäre ein Kurbelarm von 2,50 m Länge notwendig gewesen!

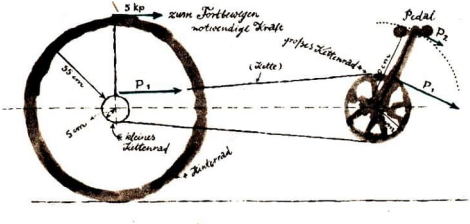
Reicht die mit einem Räderpaar zu erzielende Kraftuntersetzung nicht aus, so kann man weitere Zahnräder zwischenschalten. Man könnte auf die Achse des Zahnrades II ein „großes" Zahnrad setzen und starr mit Rad II verbinden. Dieses Rad könnte in die Zähne eines vierten, kleinen Zahnrades eingreifen, das mit der Kurbel verbunden ist. Solche mehrstufigen Getriebe sind in der Technik weit verbreitet, wir brauchen nur an Kraftfahrzeuge oder Werkzeugmaschinen zu denken. Allerdings sollen mit ihnen – dies sei hier einmal vorweggenommen – häufig nicht nur Kräfte, sondern vor allem Drehzahlen umgewandelt werden (s. S. 67).

Die Teile des Getriebes müssen nicht unmittelbar wie Zahnräder ineinandergreifen. Es können auch Riemen, Seile oder Ketten zwischengeschaltet werden. Sehen wir uns einmal die Kraftübertragung beim Fahrrad an! Die Durchmesser der Räder – Hinterrad, kleines Kettenrad, großes Kettenrad, Pedalarm – sind wieder in die Skizze eingetragen.

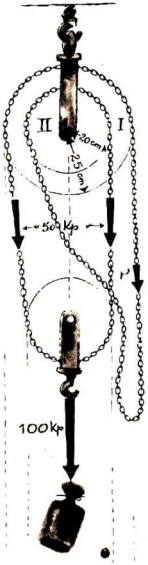
Nehmen wir als Kraft, die zum Fortbewegen des Rades notwendig ist, 5 kp an. Das Hebelgesetz, angesetzt für Hinter- und kleines Kettenrad, ergibt, daß am kleinen Kettenrad eine Kraft von 35 kp wirken muß. Sie ist größer als die unmittelbar zum Fahren notwendige Kraft – es kommt beim Radfahren nämlich vor allem darauf an, eine hohe Drehzahl des Hinterrades zu erreichen.

$$5 \cdot P_1 = 5 \cdot 35$$
$$P_1 = 35\,[kp]$$

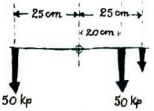
Die Kette ist lediglich Kraftvermittler. Infolgedessen hat auch am großen Kettenrad eine Kraft von 35 kp anzugreifen.



$$20 \cdot P_2 = 10 \cdot 35$$
$$P_2 = 17{,}5\,[kp]$$



$$25 \cdot P + 20 \cdot 50 = 50 \cdot 25$$
$$25 \cdot P + 1000 = 1250$$
$$25 \cdot P = 250$$
$$P = 10\,[kp]$$



Um die durch Treten aufzuwendende Kraft zu berechnen, setzen wir noch einmal das Hebelgesetz an – diesmal für großes Kettenrad und Pedalarm.

17,5 kp haben wir mit unseren Beinmuskeln aufzubringen! Würden wir das Kettenrad auf einen Halbmesser von 12,5 cm vergrößern, so wäre – unsere Leser können das mit dem Hebelgesetz selbst leicht nachprüfen – die erforderliche Kraft bereits knapp 22 kp! Die allen Radfahrern bekannte Regel „Je größer die Übersetzung, desto anstrengender ist das Fahren" findet damit ihre physikalische Erklärung.

Als Winde besonderer Art wollen wir noch den Differentialflaschenzug kennenlernen. Er besteht aus einem „großen" und aus einem „kleinen" Rad (I bzw. II). Sie sitzen auf einer Welle und sind fest miteinander verbunden. Die Last hängt an einer losen Rolle. Sämtliche Rollen sind gezähnt oder geriffelt, so daß die beim Differentialflaschenzug verwendete endlose Kette nicht rutschen kann.

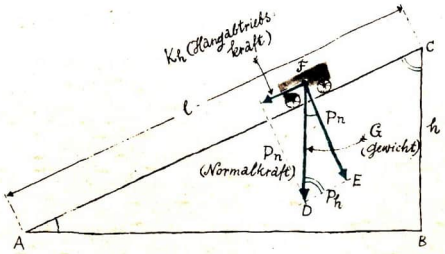
Sobald wir an der Kette eine Kraft „*P*" wirken lassen, wird das linke, zur losen Rolle führende Seil verkürzt, das rechte dagegen verlängert. Da Rolle I jedoch einen größeren Durchmesser aufweist als Rolle II, kommt insgesamt eine Verkürzung heraus. Die Last – wieder haben wir 100 kp angehängt – steigt nach oben.

Wie groß ist die Kraft *P*? Wenden wir das Hebelgesetz an, so müssen wir beachten, daß zwei Kräfte die Rollen I und II im Uhrzeigersinn zu drehen suchen: Die gesuchte Kraft *P* und die auf die Rolle II wirkende halbe Last von 50 kp (selbstverständlich verteilt sich das Gewicht gleichmäßig auf die beiden Teile der über die lose Rolle laufenden Kette). Gegen den Uhrzeiger ziehen 50 kp an der Rolle I. Aus der nebenstehenden Rechnung ergibt sich, daß an der Kette eine Kraft von 10 kp aufzubringen ist, wenn die Last in der Schwebe gehalten werden soll.

Durch geeignete Abmessungen der Rollen I und II können wir beliebig viel Kraft sparen. Je weniger sich die Rollendurchmesser unterscheiden, desto geringer ist die zum Heben notwendige Kraft. Allerdings nimmt – wie es die goldene Regel der Mechanik fordert – die Dauer des Hochwindens zu: Ist der Unterschied der Rollendurchmesser gering, so wird fast ebensoviel Kette nachgelassen wie hochgezogen; die Last steigt nur sehr langsam.

Bergauf und bergab

Auf abschüssigem Waldweg steht ein Langholzwagen. Seine Bremsen sind fest angezogen, seine Räder auf der Talseite durch massive Holzklötze verkeilt: Sicherheitsvorkehrungen, die verhindern sollen, daß der Wagen talwärts zu rollen beginnt.
Forstarbeiter haben zwei lange Bohlen schräg-seitlich am Wagen angesetzt. Über diese provisorische Rampe wälzen sie die geschlagenen Stämme auf die Ladefläche.
Warum könnte der Wagen ins Rollen kommen? Wieso erleichtert die Rampe sein Verladen? Beiden Vorgängen ist zunächst nur gemeinsam, daß sie auf einer geneigten Fläche vonstatten gehen. Gerade darauf aber kommt es an! Merken wir uns den gemeinsamen Namen, mit dem Physiker eine gegen die Waagerechte geneigte Fläche bezeichnen: schiefe Ebene. Sie ist, wie wir sehr schnell erkennen werden, keineswegs eine Angelegenheit der Physiker allein, sondern begegnet uns täglich – fast könnte man sagen „stündlich".
Da wäre zunächst der Langholzwagen! Steht er auf der schiefen Ebene des Waldweges, so unterliegt er offensichtlich nur einer einzigen Kraft, seinem Gewicht. Es zieht zum Erdmittelpunkt, kann sich aber nicht unmittelbar auswirken. Wir beobachten statt dessen zwei Teilkräfte:
Die eine ist längs der schiefen Ebene gerichtet und versucht, den Wagen talwärts zu bewegen. Man nennt sie daher treffend Hangabtriebskraft (P_h).
Die zweite Teilkraft drückt den Wagen an die schiefe Ebene. Sie steht auf ihr senkrecht und heißt Normalkraft (P_n) – Physiker und Mathematiker nennen eine auf einer Fläche senkrecht stehende Linie „Normale". Sie wird in den Spuren sichtbar, die der Wagen im Boden hinterläßt.



Normalkraft und Hangabtriebskraft sind Seiten eines Kräfteparallelogramms, dessen Diagonale das Gewicht (G) des Wagens ist. Es ist daher sehr leicht, die Teilkräfte nach dem Parallelogrammverfahren (vgl. S. 23) zeichnerisch zu bestimmen.

Das gegenseitige Verhältnis der Teilkräfte wird bei einem auf einer schiefen Ebene befindlichen Körper ausschließlich durch den Neigungswinkel der Ebene bestimmt. Je steiler sie ansteigt, desto geringer wird die Normalkraft, desto größer aber gleichzeitig die Hangabtriebskraft. Wird die schiefe Ebene zur Senkrechten aufgeklappt, so verschwindet die Normalkraft, während die Hangabtriebskraft dem Gewicht gleich wird. Umgekehrt gibt es nach dem Übergang der schiefen Ebene in die Waagerechte keine Hangabtriebskraft mehr, sondern nur noch die Normalkraft, die nach Größe und Richtung mit dem Gewicht des Körpers übereinstimmt.

Soll eine Last auf der schiefen Ebene gehalten oder die schiefe Ebene heraufgezogen werden, so ist lediglich die Hangabtriebskraft zu überwinden. Sie bleibt, wie wir aus dem vorangegangenen Abschnitt wissen, stets kleiner als das Gewicht des Körpers. Es ist daher mit weniger Kraftaufwand verbunden, einen Körper über die schiefe Ebene hochzubefördern, als ihn senkrecht zu heben. Die schiefe Ebene ist, wie Hebel, lose Rolle und Winde, ein „Kraftsparer". Sie wird eingesetzt, wenn Lasten mit geringem Kraftaufwand gehoben werden sollen.

Nach schiefen Ebenen brauchen wir in unserer Umgebung nicht lange zu suchen. Jede Treppe ist eine schiefe Ebene, mit der wir unser Körpergewicht mühelos nach oben befördern können. Garageneinfahrten sind häufig schiefe Ebenen – und sei es auch nur, daß der Bordstein vor dem Garagentor entfernt und durch eine kurze Anfahrt ersetzt wurde. Auf Bergstraßen und Bergbahnen gelten die Gesetze der schiefen Ebene ebenso wie an Verladerampen oder am Ablaufberg eines Güterbahnhofs. Die „Rutsche", auf der Bauschutt, Geröll oder Sand in bereitgestellte Transportfahrzeuge gleiten, ist eine schiefe Ebene. Schrägaufzüge an Hochöfen, in Ziegeleien, Glashütten, Zementfabriken und Kokereien sind schiefe Ebenen. Sie sind auch unschwer in den Transportbändern der Landwirtschaft, auf Baustellen, Kaianlagen und Schüttgut-Lagerplätzen zu erkennen.

Der Anwendungsbereich der schiefen Ebene reicht also sehr weit, und schon daraus folgt die Notwendigkeit, das, was auf ihr vorgeht, auf möglichst einfache Weise berechnen zu kön-

nen. Wir wissen zwar, daß uns ein steiler Bergpfad mehr Mühe bereitet als der sanft ansteigende „Promenadenweg", doch genügt diese Beobachtung nicht, um beispielsweise die zulässige Steigung und die Trasse für eine Bergbahn oder eine Paßstraße im voraus festzulegen. Dazu brauchen wir exakte Angaben, dazu brauchen wir Zahlen!

Je steiler, je geneigter die schiefe Ebene ist, desto größer ist die Hangabtriebskraft und desto größer infolgedessen auch die Kraft, die ihr das Gleichgewicht hält. Wenn wir von dieser Beobachtung ausgehen, müssen wir uns zunächst darüber verständigen, was wir unter der Neigung einer schiefen Ebene verstehen wollen.

An Bergstraßen können wir Schilder entdecken, auf denen etwa steht: Steigung 1 : 20 auf 2 km. Diese Angabe will uns aufklären, daß wir jeweils um 1 m höher gelangen, wenn wir 20 m weit fahren; die Angabe „auf 2 km" besagt, daß dieses Steigungsmaß über eine Strecke von 2 km anhält. „Steigung 1 : 100" würde bedeuten, daß wir 100 m weit fahren müssen, um 1 m höher zu kommen. Ähnliche Neigungstafeln kann man auch an Eisenbahnstrecken beobachten. Es ist auch üblich, die Steigung in Prozenten auszudrücken. Eine 1 %ige Steigung bedeutet, daß wir auf 100 m Weg um 1 m steigen, bei einer 3 %igen Steigung wären es auf der gleichen Strecke bereits 3 m.

Immer verstehen wir unter der Steigung oder unter der Neigung einer Straße das Verhältnis Höhenunterschied zur Weglänge. Die Neigung einer schiefen Ebene wird ebenso erklärt.

In der Skizze auf S. 49 erkennt man, daß in den Dreiecken ABC und DEF gleiche Winkel auftreten. Der Winkel bei A entspricht dem Winkel bei F, der rechte Winkel bei B dem rechten Winkel bei E, der Winkel bei C dem Winkel bei D. Daraus ergeben sich, wie die Mathematik lehrt, zahlreiche Größenbeziehungen, zum Beispiel die hier verwendete.

$$\frac{P_h}{G} = \frac{h}{l}$$

Wir haben diese Formel auch gleich etwas umgestellt. h/l ist die Neigung der schiefen Ebene, P_h die Hangabtriebskraft beziehungsweise die Gegenkraft, die ihr das Gleichgewicht hält. Damit erhalten wir die einfache Beziehung:

$$P_h = G \cdot \frac{h}{l}$$

$$\boxed{\text{Kraft} = \text{Gewicht} \cdot \text{Neigung}}$$

Das ist das „Kraftgesetz" der schiefen Ebene; wir wollen uns sofort ansehen, wie man es anwendet.

Eine elektrifizierte Bergbahn weise eine Steigung von 2,5 % auf. Welche Kraft müßten die Bremsen eines 800 Mp schweren Zuges mindestens aufbringen, um ihn bei einem Halt am „Abrutschen" zu hindern?

$$P_h = 800 \cdot \frac{2{,}5}{100} = 20\,[Mp]$$

Eine 2,5 %ige Neigung bedeutet, daß die Strecke auf 100 m um 2,5 m steigt beziehungsweise fällt. Daraus ergibt sich unsere Gleichung.

Da wir das Zuggewicht in Mp eingesetzt haben, kommt auch die Hangabtriebskraft P_h in Mp heraus. 20 Mp wären also nötig, um den Zug zu halten. In Wirklichkeit allerdings müssen die Bremsen eine weit größere Kraft ausüben können, da man stets mit mehrfacher „Sicherheit" arbeitet.

$$\boxed{\frac{P_h}{L} = \frac{h}{l}}$$

$$l = \frac{L \cdot h}{P_h}$$

$$l = \frac{5000 \cdot 8}{1000} = 40\,[m]$$

Ein zweites Beispiel: Ein Schrägaufzug habe eine Last von 5000 kp 8 m hoch zu befördern. An der Seilwinde aber stehe nur eine Kraft von 2000 kp zur Verfügung. Wie lang muß die Bahn des Schrägaufzuges gemacht werden, wenn die Winde im Normalfall nur mit halber Belastung arbeiten soll?

Mit unserer Einschränkung stehen im „Normalfall" nur 1000 kp als Gegenkraft zur Hangabtriebskraft bereit. Wir benutzen die Formel von S. 51, die wir nach l auflösen. Es ergibt sich, daß die Bahn des Schrägaufzuges 40 m lang sein muß, wenn die Winde unter den angegebenen Bedingungen arbeiten soll.

Schon aus diesen beiden Beispielen sind die großen Möglichkeiten der einfachen Formel von Seite 51 zu erkennen. Wir wollen uns weitere Beispiele sparen und dafür lieber noch die wohl häufigste Anwendung der schiefen Ebene erwähnen: Es ist die Schraube, die wir benutzen, um Körper fest, aber doch jederzeit lösbar miteinander zu verbinden.

Eine Schraube ist nichts anderes als eine um einen Zylinder gewickelte schiefe Ebene, auf der die Schraubenmutter gleitet. Man kann sich davon leicht überzeugen, indem man aus Papier ein rechtwinkliges Dreieck schneidet und diese „schiefe Ebene" um einen Bleistift wickelt: Die Schraubenlinie ist deutlich zu erkennen. Auf einer schiefen Ebene können wir mit gleicher Kraft eine um so größere Last halten, je geringer die Neigung der Ebene ist. Entsprechendes gilt für die Schraube: Gibt man ihrem Gewinde eine sehr kleine Steigung, so lassen sich durch Eindrehen einer Schraube oder Anziehen einer Schraubenmutter große und größte Kräfte ausüben. Das wird nicht nur zur Verbindung verschiedener Werkstücke ausgenutzt, sondern auch in sämtlichen Schrauben- und Spindelpressen.

Geschwindigkeitsmessung ist keine Hexerei!

„11 Minuten und 22 Sekunden zeigt die große Stoppuhr am Turm der Rennleitung . . . Das, liebe Hörerinnen und Hörer, ist die Entscheidung, das ist die höchste Geschwindigkeit, die heute auf dieser Bahn erreicht wurde! Und da kommt bereits wieder die Nummer 14, der rote Wagen mit . . ." So der Rundfunkreporter. Eigentlich wollte er etwas ganz anderes ausdrücken: 11 min und 22 s betrug die kürzeste Zeit, in der an diesem Renntage eine Runde bewältigt wurde. Eine Geschwindigkeitsangabe aber ist das zunächst nicht, denn Minuten und Sekunden sind Zeiteinheiten.

Sollte der Romanautor recht haben, dessen Zug „mit einer Geschwindigkeit von 60 Meilen über die vibrierende Brücke raste"? Auch diese Angabe ist falsch; man kann Geschwindigkeiten weder in Meilen, noch in Kilometern, noch in einer anderen Längeneinheit messen.

Emsige Zeitungsleser würden uns wahrscheinlich zuflüstern: „Geschwindigkeiten werden in Stundenkilometern angegeben, das weiß doch jedes Kind." Nun ist die Geschwindigkeitseinheit „Stundenkilometer" (manchmal liest man sogar „Kilometerstunden") zwar sehr verbreitet, aber ebenfalls physikalisch falsch.

Raten wir nicht weiter, sondern überlegen wir, was eigentlich unter Geschwindigkeit zu verstehen ist. Da fahren ein LKW und ein PKW auf der Autobahn. Nach einer Stunde ist der LKW 45 km, der PKW 85 km vom Ausgangspunkt entfernt. Der PKW hat in der gleichen Zeit eine größere Wegstrecke hinter sich gebracht. Wir können diesen Sachverhalt auch anders ausdrücken: Für eine Strecke von beispielsweise 50 km braucht der PKW viel weniger Zeit als der LKW, weil der PKW mit größerer Geschwindigkeit fährt.

Stets gehören also Weg- *und* Zeitangaben zur Charakterisierung einer Geschwindigkeit, und immer spielt die in einer gewissen Zeitspanne zurückgelegte Wegstrecke eine Rolle.

Das führt uns zu der Definition:

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$$

oder, mit den üblichen Abkürzungen geschrieben:

$$v = \frac{s}{t}$$

Eine Geschwindigkeitseinheit mit eigenem Namen hat man nicht eingeführt; man begnügt sich, die Geschwindigkeit

eines Körpers durch die entsprechenden Weg- und Zeiteinheiten auszudrücken. Das hat den Vorteil, daß man die Einheiten so wählen kann, daß weder zu große noch zu kleine Zahlenwerte herauskommen. Fahrzeuggeschwindigkeiten, von denen wir ausgingen, werden zum Beispiel in der Einheit km/h (gelesen: Kilometer je Stunde) angegeben; die weit verbreitete Benennung Stundenkilometer hat als Geschwindigkeitsangabe überhaupt keinen Sinn.

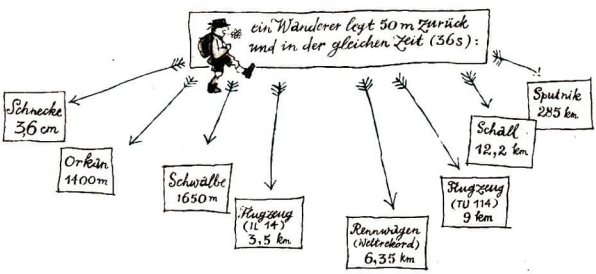
In der Physik mißt man Geschwindigkeiten häufig in cm/s oder m/s. Die Angabe m/s ist auch bei sehr hohen Geschwindigkeiten üblich. So weiß heutzutage jeder Zeitungsleser, daß eine Geschwindigkeit von 11 200 m/s notwendig ist, um Raketen der Anziehungskraft unseres Planeten entkommen zu lassen.

Für Schnittgeschwindigkeiten von Werkzeugmaschinen wiederum ist eine Angabe in m/min zweckmäßig.

Selbstverständlich lassen sich, wenn notwendig, alle Geschwindigkeitsangaben ineinander umrechnen. Ein D-Zug mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h legt in 1 h (3600 s) 72 000 m zurück. Setzen wir diese Werte in die Geschwindigkeitsformel ein, so erhalten wir 20 m/s.

$$v = \frac{72\,000}{3\,600} = 20\ \mathrm{m/s}$$

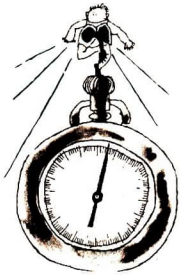
Dem Kursbuch können wir entnehmen, daß ein D-Zug für die 120 km von Leipzig nach Dresden-Hauptbahnhof 130 min braucht. Rechnen wir seine Geschwindigkeit nach diesen Angaben aus, so kommen wir auf 55 km/h. In Wirklichkeit allerdings wird der Zug keineswegs immerfort mit dieser Geschwindigkeit fahren. Beim Bremsen und Anfahren ist er langsamer, auf freier Strecke schneller, und zwischendurch hat er sogar einige Male die „Geschwindigkeit Null", nämlich während seiner Aufenthalte in Wurzen, Oschatz, Riesa und Dresden-Neustadt.



Auch ein Auto, das in 1 Stunde 100 km zurücklegt, fährt nicht ständig mit 100 km/h, sondern ist streckenweise langsamer, streckenweise schneller; seine Geschwindigkeit pendelt ständig um den nach der Geschwindigkeitsformel errechneten Wert.

Die Geschwindigkeitsformel liefert also die „Durchschnittsgeschwindigkeit" eines Körpers. Eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 100 km/h bedeutet: Das betreffende Fahrzeug mag zwar fortwährend in geringem Maße seine Geschwindigkeit ändern, aber es kommt in einer Stunde 100 km weiter. Das Resultat ist das gleiche, wie wenn der Wagen eine Stunde lang unverändert mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h gefahren wäre.

Wie mißt man Geschwindigkeiten? Das Vorbild jeder Geschwindigkeitsmessung können wir auf dem Sportplatz beobachten: Eine bestimmte Strecke – zum Beispiel 100 oder 400 m – wird abgemessen, und Stoppuhren stellen die Zeit fest, die ein Läufer für diese Strecke braucht. Bei der Auswertung rechnet man allerdings nicht in Geschwindigkeiten um, sondern begnügt sich mit Zeitangaben. Man hat es ja stets mit Standardentfernungen zu tun, so daß dieses Mal die Zeitangabe zur Charakterisierung der Geschwindigkeit hinreicht.

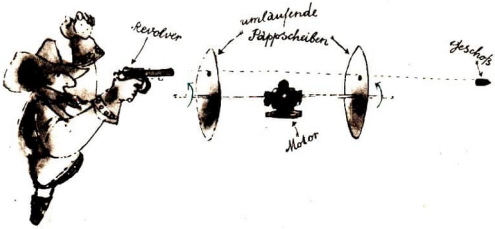


Das gleiche Verfahren könnten wir auf der Autobahn oder im fahrenden Zug wiederholen: Wir bestimmen möglichst genau die zwischen dem Vorbeisausen zweier Kilometersteine verstreichende Zeit und errechnen mit ihrer Hilfe die Geschwindigkeit. Technisch befriedigend ist diese Methode allerdings nicht. Deshalb finden wir in Fahrzeugen Instrumente, die die Geschwindigkeit unmittelbar angeben. Von ihrer Wirkungsweise lesen wir später. Immer dann, wenn Fahrzeuggeschwindigkeiten sehr genau festzustellen sind, greift man aber auf das „Sportplatzverfahren" zurück.

Die Stoppuhr versagt bei sehr hohen Geschwindigkeiten, da die Meßstrecke in so kurzen Zeitspannen zurückgelegt wird, daß eine einfache Zeitmessung nicht mehr möglich ist. Wie bestimmt man nun solche Geschwindigkeiten? Wie mißt man zum Beispiel die Geschwindigkeit eines Geschosses?

Recht einfach ist die Anwendung des „ballistischen Pendels". Man läßt das Geschoß in einen frei aufgehängten Körper einschlagen. Er besteht aus einem Stoff, in dem das Geschoß bis zum Stillstand abgebremst wird (Sandsack!). Durch den Anprall schwingt dieses Pendel aus; die Höhe, bis zu der es schwingt, hängt unter anderem von der Masse und von der

Geschwindigkeit des aufprallenden Geschosses ab. Die Geschoßgeschwindigkeit läßt sich daraus errechnen.
Bei einem anderen Verfahren benutzt man zwei auf einer gemeinsamen Achse schnell umlaufende Kartonscheiben.



Das Geschoß durchschlägt die linke Scheibe und fliegt weiter zur rechten, die es gleichfalls durchbohrt. Da das Geschoß aber eine gewisse Zeit braucht, um die Strecke zwischen den Scheiben hinter sich zu bringen, hat sich die rechte Scheibe bereits etwas weitergedreht, wenn das Geschoß eintrifft. Die beiden Schußlöcher sind gegeneinander versetzt. Aus dem Abstand der Scheiben, aus ihrer Drehzahl und aus der Versetzung der Schußlöcher kann die Geschoßgeschwindigkeit bestimmt werden. Übrigens werden wir diesem Verfahren in abgewandelter Form noch einmal begegnen, wenn wir die Lichtgeschwindigkeit, die größte aller Geschwindigkeiten, kennenlernen.
Bei der Messung hoher Geschwindigkeiten haben sich auch elektrische und fotografische Methoden bewährt. Es gibt Fotoeinrichtungen, die mit Hilfe schnell aufeinanderfolgender elektrischer Funken in jeder Sekunde 1 Million und mehr Aufnahmen machen. Hält man einen schnell ablaufenden Vorgang mit einer solchen Kamera fest, so kann man aus den Aufnahmen nachträglich die Geschwindigkeit des gefilmten Körpers bestimmen.

Zwischen Achterbahn und Weltraumschiff

Zu einem richtigen Rummelplatz gehört als Hauptattraktion die Achterbahn. Meist gelingt es erst nach kurzem Warten, einen Platz in einem der kleinen Wagen zu erobern – zu groß ist die Zahl derer, die an der wechselvollen Fahrt ihre Freude haben. Langsam und gleichmäßig werden die Wagen zunächst bis auf den höchsten Punkt der Bahn geschleppt. Und dann saust das Gefährt, schneller und immer schneller werdend, zu Tal; Lichterketten huschen vorbei; unser Magen aber scheint, vorsichtig ausgedrückt, leichter zu werden und sich zu heben. Mit voller Fahrt passieren wir das Tal und fahren dann, nur vom Schwung getrieben, auf die nächste, schon etwas niedrigere Höhe hinauf. Oben angelangt, meinen wir fast zu stehen, doch schon beginnt das Hinabsausen von neuem, und so wiederholt sich das Spiel noch einige Male, bis der anfängliche Schwung des Wagens aufgezehrt ist und wir, leicht benommen, aussteigen.

Die Achterbahn taucht deswegen in diesem Buch auf, weil wir an ihr eine ganz neue Form von Bewegungen beobachten können. Hatten wir im vorigen Kapitel angenommen, daß die Geschwindigkeit eines Körpers stets gleich bleibt, so ist das bei der Achterbahn grundsätzlich anders. Fortwährend nimmt die Geschwindigkeit zu oder ab. Der Physiker nennt solche Bewegungen beschleunigt. Er spricht von positiver Beschleunigung oder auch einfach von Beschleunigung, wenn die Geschwindigkeit eines Körpers größer wird, von negativer Beschleunigung oder Verzögerung, wenn die Geschwindigkeit abnimmt. Später werden wir erfahren, daß auch jede Kurvenfahrt eine beschleunigte Bewegung ist. Im Gegensatz dazu heißt eine Bewegung gleichförmig, wenn sie sich geradlinig und mit unveränderter Geschwindigkeit vollzieht.

Beschleunigte Bewegungen können wir überall beobachten. Ein anfahrender Wagen wird schneller, er wird beschleunigt; bremst er, so nimmt seine Geschwindigkeit ab, seine Bewegung verläuft verzögert. Nicht anders ist es bei Drehbewegungen: Ein Motor läuft beschleunigt an, denn seine Drehzahl nimmt zu; er läuft mit negativer Beschleunigung aus, denn seine Drehzahl nimmt ab. Eine Gewehrkugel bewegt sich im Lauf beschleunigt. Sie wird durch den Druck der Pulvergase auf die Geschwindigkeit gebracht, mit der sie die Mündung verläßt.

Ein S-Bahnzug oder ein Dieseltriebwagen kommen schneller in Fahrt als eine Dampflokomotive, ihre Beschleunigung

ist also größer. Ein LKW mit beladenem Anhänger fährt langsamer an als ein Kleinwagen; die Beschleunigung des Lastzuges ist geringer als die des PKW. Wir müssen daher nach einer präzisen Formulierung suchen, die es uns erlaubt, Beschleunigungen unmißverständlich und in Zahlen auszudrücken.

Wir legen fest: Beschleunigung (Verzögerung) ist die Geschwindigkeitsänderung in einer gewissen Zeitspanne:

„Beschleunigter Umlauf"

$$\text{Beschleunigung (Verzögerung)} = \frac{\text{Geschwindigkeitsänderung}}{\text{Zeit}}$$

Im täglichen Leben nimmt man es mit dem Begriff „beschleunigt" nicht zu genau. Früher kannte man „beschleunigte Personenzüge"; es waren nicht etwa Züge mit ständig wachsender Geschwindigkeit, sondern Züge, die schneller als normale Personenzüge fuhren. Auch der „beschleunigte Umlauf" eines Aktenstückes besagt nicht, daß es mit ständig zunehmender Geschwindigkeit von Abteilung zu Abteilung weitergereicht wird, sondern nur, daß seine Bearbeitung vordringlich erfolgen soll. Für den Physiker jedoch bedeutet Beschleunigung stets wachsende oder sinkende Geschwindigkeit.

$$b = \frac{(5-0)}{10}\,\frac{m/s}{s} = 0{,}5\ m/s^2$$

Fügen wir ein Zahlenbeispiel ein. Ein Fahrzeug erreiche aus der Ruhe innerhalb von 10 s eine Geschwindigkeit von 5 m/s. Daraus berechnen wir seine Beschleunigung.

Wir wissen noch nicht, in welchen Einheiten wir die Beschleunigung auszudrücken haben. Die Geschwindigkeit messen wir in m/s, die Zeit in s. Da wir aber die Geschwindigkeit nochmals durch die Zeit zu teilen haben, ergibt sich für die Beschleunigung $\frac{m/s}{s}$, und das läßt sich nach den Regeln der Bruchrechnung zu m/s^2 (gelesen: Meter je Sekunde zum Quadrat) vereinfachen. Beschleunigungen werden also in m/s^2 gemessen, und wenn wir immer an die Entstehung dieser Benennung denken, werden wir nie darüber stolpern, daß hier eine Zeiteinheit im Quadrat auftritt. Es ist nur die Folge einer rechnerischen Vereinfachung, „Quadratsekunden" gibt es natürlich nicht.

Damit hat sich unser Beispiel schon erledigt, denn nun noch auszurechnen, daß die Beschleunigung 0,5 m/s^2 beträgt, ist ein Kinderspiel.

In unserem Beispiel nahmen wir an, daß sich das Fahrzeug gleichmäßig beschleunigt bewegt, das heißt, seine Geschwindigkeit nahm in jeder Sekunde um den gleichen Betrag zu. Das braucht durchaus nicht immer so zu sein. Auch die Beschleunigung kann sich fortwährend ändern; doch sind ungleichmäßig beschleunigte Bewegungen zu kompliziert, als daß wir uns mit ihnen beschäftigen könnten.

Lernen wir noch ein „Muster" einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung kennen: die Fallbewegung. Daß Körper fallen, zählt zu den frühesten und elementarsten Naturbeobachtungen. Man sollte daher meinen, daß die Untersuchung der Fallbewegung am Anfang der Naturwissenschaft gestanden hätte. Das war jedoch nicht der Fall. Es gab über die Fallbewegung nur unklare Ansichten und seit Aristoteles (384 bis 322 v. u. Z.) sogar falsche Vorstellungen – Vorstellungen, die sich durch einfachste Experimente hätten widerlegen lassen. Es ist das Verdienst Galileo Galileis (1564 bis 1642), diese Experimente angestellt zu haben.

Nehmen wir zunächst an, es gäbe keinen Luftwiderstand. Dann fielen alle Körper gleich – unabhängig von ihrem Gewicht. Im luftleeren Raum kämen ein Sack Zement und eine Feder, in derselben Höhe losgelassen, gleichzeitig am Boden an. Daß ein Stein die Erdoberfläche eher erreicht als ein aus gleicher Höhe fallendes Blatt Papier, liegt ausschließlich am Luftwiderstand, nicht am unterschiedlichen Gewicht. Ein Blatt Seidenpapier schwebt zu Boden; es *fällt*, wenn es fest zusammengeknüllt wird.

Alle Körper erfahren während des Fallens die gleiche Beschleunigung. Sie beträgt in Mitteleuropa 9,81 m/s². Das bedeutet, daß ein fallender Körper nach der ersten Sekunde eine Geschwindigkeit von 9,81 m/s, nach der zweiten eine von 19,62 m/s, nach der dritten eine von 29,43 m/s (das ist bereits mehr als D-Zugsgeschwindigkeit) besitzt. Ein Dachziegel, der von einem 20 m hohen Gebäude herunterfällt, erreicht die Erde mit einer Geschwindigkeit von fast 20 m/s! Ein Motorradfahrer, der mit 20 m/s (72 km/h) gegen ein Hindernis prallt, schlägt mit der gleichen Geschwindigkeit auf, als wenn er sich aus 20 m Höhe herabstürzen würde.

Wir haben behauptet, die Fallbeschleunigung betrage in *Mitteleuropa* 9,81 m/s². Diese Angabe ist unbedingt notwendig. Die Fallbeschleunigung ist eine Folge der Erdanziehung; da die Schwerkraft nicht an allen Punkten gleich groß ist, ändert sich auch die Fallbeschleunigung. Ein Stein fällt am Nordpol etwas schneller als am Äquator (vgl. S. 10). Seine

Fallbeschleunigung beträgt am Nordpol 9,83 m/s², am Äquator 9,78 m/s². Der Unterschied ist gering und kann oft unbeachtet gelassen werden. Es gibt aber auch Beispiele dafür, daß selbst diese geringfügige Änderung bisweilen wichtig ist.
Das Pendel einer Uhr „fällt" bis zu seinem tiefsten Punkt, wenn auch auf einem Kreisbogen. Da es am Nordpol schneller fällt als am Äquator, geht eine Pendeluhr, die bei uns richtig anzeigt, am Nordpol vor, am Äquator nach. Die Zeitdifferenz macht zwar nur wenige Sekunden am Tage aus, immerhin kann sie zum Beispiel bei astronomischen Messungen stören. Man berücksichtigt sie durch eine Korrektur der Pendellänge. Auch mit zunehmender Höhe wird natürlich die Fallbeschleunigung geringer.
In jüngster Zeit hat die Fallbeschleunigung – man kürzt sie mit „*g*" ab – besondere Bedeutung erlangt: Es ist die Beschleunigungseinheit der Raketentechnik und Raumschifffahrt. Eine Beschleunigung von „2 *g*" bedeutet, daß ein Körper sich mit einer Beschleunigung von 19,62 m/s² bewegt. Moderne Großraketen erreichen nach dem Start für eine halbe Minute etwa eine Beschleunigung von 20 *g*. Ihre Endgeschwindigkeit nach dieser Zeit beträgt daher mehr als 21 000 km/h!

Trägheit — physikalisch gesehen

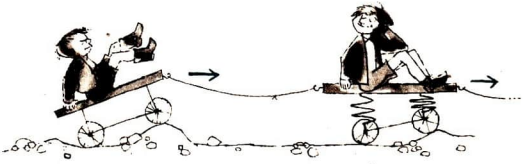
Wir haben erwähnt, daß unser Magen das Achterbahnfahren auf seine Weise quittiert. Doch das ist keineswegs die einzige fühlbare Auswirkung einer beschleunigten Bewegung. In der anfahrenden Straßenbahn (Beschleunigung!) laufen wir Gefahr, nach hinten zu fallen; bremst die Bahn (Verzögerung!), so können wir gegen unseren Vordermann prallen. Fährt ein Aufzug mit uns plötzlich nach oben an, so scheint uns ein Stein im Magen zu liegen; setzt er sich nach unten in Bewegung, so haben wir für einen Augenblick das erwähnte Achterbahn-Gefühl.
Leblose Gegenstände reagieren ebenfalls auf Beschleunigungen und Verzögerungen. Bremst ein Zug zu rasch, so fallen Koffer in Fahrtrichtung aus dem Gepäcknetz. Fährt ein mit Kisten hoch beladener Lastkraftwagen zu heftig an, so kann man das gleiche beobachten: Einige Kisten stürzen nach hinten auf die Straße oder die Ladung verrutscht. Umgekehrt

kann man ein Tuch mit einem Ruck unter einem gefüllten Glas wegziehen, ohne daß dieses kippt.
Fassen wir diese Beobachtungen, die sich beliebig ergänzen ließen, zusammen, so können wir sagen: Jeder Körper setzt einer Beschleunigung, einer Verzögerung und, wie wir einmal vorwegnehmen wollen, auch jeder Richtungsänderung einen Widerstand entgegen. Alle Körper sind „träge"; sie zeigen ein „Beharrungsvermögen", sie besitzen eine gewisse „Trägheit" und suchen ihren jeweiligen Bewegungszustand beizubehalten. Diese Zusammenhänge wurden bereits von Galilei erkannt und später als „Trägheitsgesetz" von Newton ausgesprochen:

Ein Körper bleibt im Zustand der Ruhe
oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung,
solange keine Kraft auf ihn einwirkt.

Wenden wir das Trägheitsgesetz auf die genannten Beispiele an: Beim Anfahren ändern die Straßenbahn und wir den Bewegungszustand; wir werden schneller. Das Beharrungsvermögen aber sucht unseren Körper im „alten" Bewegungszustand, in der Ruhestellung zu halten. Infolgedessen drohen wir nach hinten umzufallen. Bremst die Bahn aus voller Fahrt, so ändert sich der Bewegungszustand erneut. Diesmal „möchte" sich unser Körper auf Grund seines Beharrungsvermögens weiterbewegen; wenn wir uns nicht festhalten, kippen wir nach vorn. Ebenso ergeht es den aus dem Gepäcknetz stürzenden Koffern. Beim Weinglas endlich ist die Trägheit so groß, daß es an Ort und Stelle bleibt und dem Tuch nicht folgt.
Das Trägheitsgesetz geht allerdings noch über unsere Beispiele hinaus; denn es behauptet, daß ein Körper, der in geradlinige, mit unveränderter Geschwindigkeit ablaufende Bewegung versetzt wurde, sich immerfort weiterbewegt, solange keine Kraft auf ihn einwirkt. Eine Kugel, einmal angestoßen, müßte mit gleichbleibender Geschwindigkeit weiter und immer weiter rollen. Ein Fahrzeug brauchte, einmal auf seine Reisegeschwindigkeit gebracht, keinen weiteren Antrieb.
Wir wissen, daß diese Behauptung des Trägheitsgesetzes sich nicht unmittelbar experimentell nachweisen läßt; denn es ist nicht möglich, einen Körper „kräftefrei" zu machen und alle Widerstände zu beseitigen, die seine Bewegung allmählich aufzehren. Wir brauchen nur an den Luftwiderstand oder an

die bei jeder Bewegung auftretende Reibung zu denken. Immerhin ist es gelungen, möglichst reibungsarm gelagerte Räder in einem luftleer gepumpten Gehäuse nach einmaligem Anstoß tagelang weiterlaufen zu lassen.
Nun, derartige Versuche haben vorerst hauptsächlich wissenschaftliche Bedeutung. Trotzdem ist das Trägheitsgesetz für die technische Praxis sehr wichtig: Um einen Körper in gleichförmiger Bewegung zu halten, ist keine „zusätzliche" Kraft notwendig; die Antriebskraft braucht nur so groß zu sein, daß alle auftretenden Widerstände überwunden werden.
Die Kraft, die ein Radfahrer bei gleichbleibender Geschwindigkeit auf gerader und ebener Strecke aufwenden muß, dient nicht der „Bewegung an sich", sondern ist nur dazu da, die Bewegungswiderstände (Reibung, Luftwiderstand) zu überwinden. Hört der Fahrer auf zu treten, so läßt ihn das Beharrungsvermögen noch ein ganzes Stück weiter rollen.
Pfeil und Bogen, Katapulte und sämtliche ballistischen Waffen gäbe es nicht ohne die Beziehungen, die im Trägheitsgesetz niedergelegt sind. Vom Blasrohr bis zum Schiffsgeschütz bleibt sich das Prinzip aller Schußwaffen gleich: Ein Geschoß wird beschleunigt und fliegt auf Grund seiner Trägheit und unter dem Einfluß der Erdanziehung (und anderer Kräfte) ins Ziel.
Bei der Federung von Fahrzeugen wird das Beharrungsvermögen ebenfalls bewußt ausgenutzt. Wäre in dem Bild der Sitz starr mit dem Fahrgestell verbunden, so müßten wir alle Bodenunebenheiten mitmachen. Die Federn aber lassen die Trägheit unseres Körpers sich voll auswirken. Bei einem plötzlichen „Hopser" (große Beschleunigung nach oben!) drücken wir die Federn zusammen; unser Körper verändert seine Lage nur wenig.
An Maschinen sorgt die Trägheit massiver Schwungräder auch dann für gleichmäßigen Lauf, wenn Antriebskraft oder -geschwindigkeit geringfügig schwanken. Die „toten Punkte"



von Kolbenmotoren oder Dampfmaschinen werden ebenfalls durch die Trägheit von Schwungrädern überwunden.
Sogar die Erdbebenforscher ziehen Nutzen aus dem Beharrungsvermögen: Ihre Seismographen, das heißt Erdbebenschreiber, bestehen im wesentlichen aus einer großen, federnd aufgehängten oder unterstützten Masse. Sie folgt wegen ihrer Trägheit plötzlichen Erdstößen und Erschütterungen nicht. Die Lage der Masse gegenüber der Erdoberfläche ändert sich infolgedessen geringfügig. Diese Änderungen lassen einen Schreibhebel über einen Papierstreifen gleiten und so die Erdstöße aufzeichnen. Auch bei der Feststellung ferner Kernexplosionen helfen Seismographen.
Besonders deutlich ist das Beharrungsvermögen eines Körpers spürbar, wenn es gilt, ihn in Bewegung zu setzen oder abzubremsen. Der Motor eines anfahrenden Kraftwagens muß nicht nur die Reibung und den Luftwiderstand überwinden, sondern er hat auch zusätzliche Kraft zu liefern, um mit dem Beharrungsvermögen des Wagens fertigzuwerden. Die Muskeln eines Radfahrers werden beim „Antreten" weit mehr beansprucht als bei ruhiger Fahrt mit unveränderter Geschwindigkeit. Es fällt einem Erwachsenen nicht schwer, allein einen Güterwagen zu schieben, wenn dieser vorher von mehreren Helfern angeschoben, das heißt in Fahrt gebracht wurde. Umgekehrt sind Kräfte notwendig, um beim Bremsen eines Fahrzeugs oder einer Maschine das Beharrungsvermögen zu überwinden.
Ohne Kraftaufwand keine Änderung des Bewegungszustandes! Ohne Kraftaufwand keine Beschleunigung oder Verzögerung! Diese aus dem täglichen Leben bekannte Tatsache hat ihre Ursache in der Trägheit der Körper. Die tägliche Erfahrung beantwortet auch die Frage danach, wie groß die Kraft sein muß, die die Trägheit eines bestimmten Körpers überwindet: Es ist leichter, einen unbeladenen als einen beladenen Wagen in Fahrt zu bringen. Der unbeladene Wagen läßt sich auch mit geringerem Kraftaufwand bremsen als der beladene. Eine Lokomotive stößt vor dem Anfahren häufig erst ein kurzes Stück zurück. Dadurch schieben sich die Wagen etwas zusammen, die Kupplungen hängen durch, und beim Anziehen werden die Waggons nacheinander in Bewegung gesetzt. Die Lokomotive muß nicht auf einmal die Trägheit des ganzen Zuges überwinden.
Die Größe der zum Beschleunigen oder Abbremsen eines Körpers notwendigen Kraft hängt also von der Stoffmenge des Körpers, von der Masse ab. Doppelte Masse erfordert

bei gleicher Beschleunigung doppelte Kraft, dreifache Masse dreifache Kraft.
Auch die Größe der Beschleunigung wirkt sich auf die Kraft aus: Der Motor eines Rennwagens, der schnell auf hohe Geschwindigkeit kommen soll, heult auf; ein sicheres Zeichen dafür, daß er stark beansprucht wird. Eine Lokomotive muß um so kräftiger anziehen, je rascher sie einen Zug auf Reisegeschwindigkeit beschleunigt. Deshalb sind Untergrund- und Schnellbahnzüge, die wegen der kurzen Strecken zwischen den Bahnhöfen die Höchstgeschwindigkeit nach möglichst kurzer Zeit erreichen sollen, mit mehreren leistungsfähigen Motoren ausgerüstet. Die zum Beschleunigen notwendige Kraft wächst also mit der Größe der Beschleunigung. Es gilt: Doppelte Beschleunigung – doppelte Kraft; dreifache Beschleunigung – dreifache Kraft.
Was wir in den letzten drei Abschnitten erfahren haben, läßt sich auch in der kurzen Sprache einer Formel ausdrücken:

$$\mathcal{P} = m \cdot b$$

Kraft = Masse · Beschleunigung

Man nennt diese ebenfalls von Newton formulierte Beziehung „dynamisches Grundgesetz". Sie verknüpft das Wirken einer Kraft und Bewegungsvorgänge zahlenmäßig miteinander und ermöglicht es, Kräfte, Massen oder Beschleunigungen zu berechnen, wenn jeweils die beiden anderen Größen des Grundgesetzes bekannt sind. Derartige Berechnungen begegnen nicht nur dem Physiker, sondern auch dem Ingenieur immer wieder.
Wenn wir einen Wagen anschieben, „empfinden" wir das dynamische Grundgesetz unmittelbar. Aber auch der Fahrgast *im* Wagen kann sich ihm nicht entziehen. In der anfahrenden Straßenbahn scheint uns eine Kraft „nach hinten" zu ziehen; beim Bremsen wirkt sie in Fahrtrichtung. Man nennt diese vom Fahrgast empfundenen Kräfte „Trägkeitskräfte".
Die sich anbahnende Raumschiffahrt hat Trägheitskräfte besonders aktuell werden lassen. Die Besatzung einer beschleunigt aufsteigenden Rakete unterliegt Trägheitskräften, sie wird „schwerer". Bei zu großen Beschleunigungen müßte das unweigerlich zum Tode führen: Das Blut würde in die unteren Körperpartien gedrängt, die Adern würden platzen, das Gehirn seine Tätigkeit einstellen. Jules Verne, der seine Weltraumfahrer mit einer Riesenkanone zum Mond schießen

wollte, hat diese „Kleinigkeit" übersehen; noch im Abschußrohr wären das Raumschiff und seine Besatzung durch die gewaltigen Trägheitskräfte vernichtet worden.
Seit Jahren werden komplizierte Experimente angestellt, um herauszubekommen, welche Beschleunigungen ein Mensch aushalten kann, ohne daß die Trägheitskräfte ihm schaden. Derartige Versuche sind nicht nur für die Weltraumfahrt, sondern auch für die Flugtechnik wichtig. Richtungweisend sind hier vor allem Arbeiten sowjetischer Forscher. Diese stellten fest, daß man für kurze Zeit zwar recht hohe Beschleunigungen ertragen kann (15 *g* für 10 s), daß aber der menschliche Körper für einige Minuten nur Beschleunigungen von 6 bis 7 *g* standzuhalten vermag. Bei solchen Beschleunigungen „wiegt" ein Mensch immerhin an die 450 kp. Wie wichtig diese Versuche waren, die in der Sowjetunion fern aller Sensationshascherei durchgeführt wurden, zeigt der erste geglückte Raumflug eines Menschen, des sowjetischen Fliegermajors Juri Gagarin.

Alles dreht sich

Wir wissen nicht, seit wann sich auf der Welt Räder drehen. Den Assyrern und Ägyptern war das Rad bereits bekannt. Alle Funde und alten Darstellungen aber zeigen bereits so vollkommene Räder, daß ohne Zweifel eine lange Entwicklung vorausgegangen sein muß. Kannte man doch zu Aristoteles' Zeiten sogar schon Zahnräder und Zahnradgetriebe.
Es bleibt daher im Dunkel, wann und wo die ersten Räder bewußt benutzt wurden. Fest steht jedoch, daß das Rad eine der größten Entdeckungen des Menschen war. Es ermöglichte erstmals, große Lasten mühelos fortzubewegen, und es steigerte die Geschwindigkeit der menschlichen Fortbewegung gewaltig. Mit Recht ist das Rad geradezu zum Symbol unseres technischen Zeitalters geworden; denn es gibt kaum eine Maschine, in der nicht Räder und Drehbewegungen eine Rolle spielen.
Als wir die fortschreitende Bewegung kennenlernten, begegneten wir dem äußerst wichtigen Begriff der Geschwindigkeit. Er ist auch bei der Drehbewegung entscheidend. Allerdings läßt sich die Geschwindigkeit einer Drehbewegung nicht ganz so einfach erfassen wie die Geschwindigkeit bei einer Bewegung auf gerader Strecke.

Überlegen wir, was beim umlaufenden Rad vor sich geht! Ein Punkt am Umfang des Rades legt bei einer Umdrehung einen Weg zurück, der dem Radumfang entspricht (er ist selbstverständlich der Strecke gleich, um die sich das rollende Rad fortbewegen würde). Ein weiter „innen", etwa auf einer Speiche, gelegener Punkt bringt in der gleichen Zeitspanne einen viel kürzeren Weg hinter sich. Das bedeutet: Er hat eine geringere Geschwindigkeit. Andererseits aber haben beide Punkte – der auf dem Umfang und der im Inneren – in der gleichen Zeit eine Umdrehung vollendet oder einen Winkel von 90, 180, 232 Grad durchlaufen.

Um Verwechslungen und Irrtümer zu vermeiden, hat man zwei Begriffe zur Charakterisierung der Drehbewegung eingeführt: Die Drehzahl (n) gibt an, wieviele Umdrehungen ein Rad in der Sekunde oder in der Minute vollführt. Sie ist unabhängig vom Durchmesser des Rades und interessiert vor allem bei Motoren und Antriebsmaschinen aller Art.

Der zweite Begriff ist der der „Umfangsgeschwindigkeit"; es ist die Geschwindigkeit, die ein Punkt am Radumfang besitzt. Die Umfangsgeschwindigkeit eines Wagenrades ist gleichzeitig die Fahrtgeschwindigkeit des Wagens (sofern er nicht „rutscht"). Bei Werkzeugmaschinen trägt die Umfangsgeschwindigkeit einen anderen Namen: Es ist die „Schnittgeschwindigkeit", die Geschwindigkeit, mit der das Werkstück am Werkzeug oder umgekehrt das Werkzeug am Werkstück entlanggeführt wird. Die Umfangsgeschwindigkeit messen wir in m/s, Schnittgeschwindigkeiten meistens in m/min.

Die Umfangsgeschwindigkeit eines Rades wird von zwei Größen bestimmt: von seinem Durchmesser und von seiner Drehzahl. Je größer bei gegebener Drehzahl ein Rad, desto schneller ist ein Punkt an seinem Umfang; je höher die Drehzahl, desto rascher bewegen sich sämtliche Teile eines Rades, also auch Punkte am Radumfang.

Zwischen der Drehzahl und der Umfangsgeschwindigkeit besteht eine wichtige Zahlenbeziehung: Wählen wir als Zeitspanne eine Sekunde, und beträgt die Drehzahl 1 Umdrehung je Sekunde, so legt ein Punkt am Kreisumfang in der Sekunde eine Strecke zurück, die dem Kreisumfang (U_K) gleich ist. Beträgt die Drehzahl 2 Umdrehungen je Sekunde, so wird in einer Sekunde der Kreisumfang zweimal zurückgelegt usf. Doppelter Weg in der gleichen Zeit – das heißt aber: doppelte Geschwindigkeit. Daraus folgt:

Umfangsgeschwindigkeit = Kreisumfang · Drehzahl

oder, in abkürzenden Buchstaben geschrieben: $v_u = U_K \cdot n$.
Der Kreisumfang läßt sich, wie die Mathematik lehrt, ohne weiteres durch den Durchmesser d ausdrücken: $U_K = \pi \cdot d$.
Damit nimmt die Formel Gestalt an.

$$\boxed{v_u = \pi \cdot d \cdot n}$$

Dreht sich zum Beispiel ein Rad von 0,7 m Durchmesser in der Sekunde fünfmal, so beträgt seine Umfangsgeschwindigkeit 11 m/s.

$$v_u = 3{,}14 \cdot 0{,}7 \cdot 5 = 11 [m/s]$$

Hätten wir den Raddurchmesser in cm eingesetzt, so wäre auch die Umfangsgeschwindigkeit in cm/s herausgekommen.
Übersetzungen haben wir bereits kennengelernt (vgl. S. 47). Dort allerdings sollten sie Kräfte umwandeln. Jetzt begegnen sie uns als Drehzahlwandler.
In der Skizze sehen wir zwei Räder. Sie sind durch einen endlosen Riemen miteinander verbunden. Rad I ist das „treibende" Rad (beispielsweise das große Kettenrad beim Fahrrad), Rad II ist das „getriebene" Rad (zum Beispiel das kleine Kettenrad beim Fahrrad). Wie verhalten sich die Drehzahlen der beiden Räder zueinander?
Der Treibriemen (beziehungsweise das Seil oder die Kette) läuft in allen Punkten gleich schnell. Andernfalls müßte er sich an der einen Seite dehnen, gegenüber aber stauchen. Der Riemen wird vom Rad I in Bewegung versetzt und läuft infolgedessen mit der Umfangsgeschwindigkeit v_{u1}. Diese Geschwindigkeit teilt er dem Rad II mit. Beide Räder haben also – und dies gilt für alle Seiltriebe und Zahnradübersetzungen – die gleiche Umfangsgeschwindigkeit.

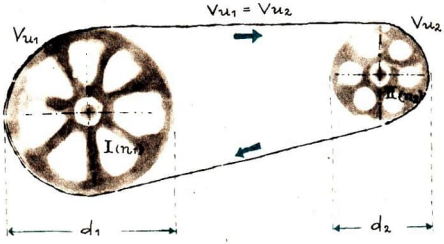
$$v_{u1} = v_{u2}$$

Der Rest ist nun sehr einfach. Wir ersetzen v_{u1} und v_{u2} durch die Ausdrücke der Formel für die Umfangsgeschwindigkeit. Die auf beiden Seiten als Faktor stehende Zahl π können wir nach den Regeln der Gleichungslehre streichen. Nach einer kleinen Umstellung erhalten wir unsere Formel.

$$\pi \cdot d_1 \cdot n_1 = \pi \cdot d_2 \cdot n_2$$

$$d_1 \cdot n_1 = d_2 \cdot n_2$$

$$\boxed{\frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1}}$$



Die Drehzahlen verhalten sich demnach umgekehrt wie die Raddurchmesser. Ist in unserem Beispiel der Durchmesser von Rad II halb so groß wie der von Rad I, so läuft Rad II doppelt so schnell wie Rad I. Soll bei einer Übersetzung das getriebene Rad fünfmal so schnell wie das treibende laufen, so muß sein Durchmesser auf ein Fünftel des Durchmessers des treibenden Rades verkleinert werden. Drei Angaben in der obenstehenden Formel müssen uns bekannt sein, damit wir die vierte berechnen können. Es spielt dabei keine Rolle, ob wir einen Durchmesser oder eine Drehzahl suchen.

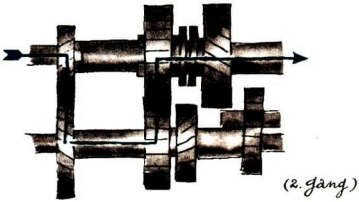
An der Formel ändert sich nichts, wenn der Riemen wegfällt und die Räder unmittelbaren Kontakt miteinander haben (zum Beispiel beim „Reibungsantrieb" des Fahrraddynamos). Besonders einfach wird die Formel, wenn sie auf Zahnradübersetzungen angewandt werden soll: Hier ersetzt man die Raddurchmesser einfach durch die Zähnezahl der Räder.

Die „große Zeit" der Seil- und Riementriebe waren die Jahrzehnte, da sämtliche Maschinen eines Werkes von einer einzigen Dampfmaschine angetrieben wurden. Durch die Maschinensäle liefen an der Decke lange Transmissionswellen mit zahlreichen Riemenscheiben. Von den Scheiben führten Treibriemen zu den Antriebsscheiben der einzelnen Maschinen. Drehzahländerungen wurden durch Wechsel der Scheibengröße (von denen oft mehrere als „Stufenscheibe" nebeneinandersaßen) herbeigeführt.

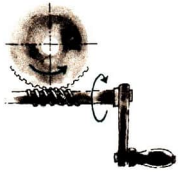
Heute sind die langen Transmissionswellen verschwunden; denn jede Maschine wird von einem besonderen Elektromotor angetrieben. Trotzdem sind noch häufig Drehzahländerungen notwendig, und „Getriebe" spielen überall in der Industrie eine große Rolle.

Durch geeignete Auswahl und Verknüpfung von Zahnrädern lassen sich mit nur wenigen Rädern verschiedene Drehzahlen und Drehrichtungen einschalten. Das bekannteste Beispiel

Wechselgetriebe eines Kraftwagens



hierfür ist das Wechselgetriebe des Kraftwagens. Aber auch in einer Taschen- oder Armbanduhr befindet sich ein aus vielen Rädern bestehendes, auf kleinstem Raum zusammengedrängtes Zahnradgetriebe.



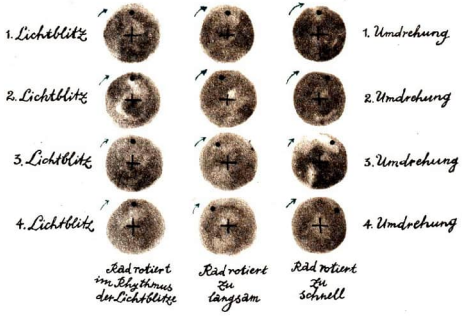
Ein Zahnradgetriebe ganz besonderer Art ist der Schneckentrieb. Die Schnecke dreht das Zahnrad bei jeder Umdrehung um einen Zahn weiter, sie ist fast so etwas wie ein „Zahnrad mit einem Zahn". Allerdings erlaubt der Schneckentrieb nur den Übergang von hohen auf niedrige Drehzahlen. Nur die Schnecke kann das Zahnrad treiben, nicht aber das Zahnrad die Schnecke.

Wie werden Drehzahlen gemessen? Am einfachsten ist es, auf dem sich drehenden Rad eine Marke anzubringen und die Umdrehungen innerhalb einer gewissen Zeitspanne abzuzählen. Doch nur wenige Räder drehen sich so langsam, daß dies tatsächlich möglich ist.

Sehr verbreitet sind heute Drehzahlmessungen mit dem „Tachometergenerator". Seine Wirkungsweise können wir wieder einmal am – Fahrrad kennenlernen. Bei eingeschaltetem Dynamo leuchtet die Lampe um so heller, je schneller wir fahren, das heißt, je rascher sich die Räder drehen. Wir könnten die Lampe durch ein elektrisches Meßinstrument ersetzen und die elektrische Spannung messen, die der Generator erzeugt. Die Instrumentenskala ließe sich unmittelbar in Drehzahlen oder bei bekanntem Raddurchmesser sogar in km/h eichen.

Genauso arbeitet der Tachometergenerator. Mit der Welle der zu messenden Maschine wird ein kleiner elektrischer Generator verbunden. Seine Spannung wird von einem in Drehzahlen geeichten Instrument angezeigt. Die Drahtleitung zwischen Generator und Instrument kann zur „Fernanzeige" beliebig verlängert werden. So lassen sich zum Beispiel die Drehzahlen sämtlicher Turbinen und Generatoren eines Kraftwerkes zentral überwachen.

Eine weitere Methode zur Drehzahlmessung gründet sich auf eine Beobachtung, die Sie sicher schon einmal im Kino gemacht haben: Da scheinen die Räder eines fahrenden Zuges auf einmal zu stehen oder sich langsam rückwärts zu drehen. Die Skizze auf S. 70 liefert die Erklärung: Ein helles Rad mit einem schwarzen Punkt rotiert. Wir beleuchten das Rad mit einer in schnellem Rhythmus aufblitzenden Lampe, einer sogenannten stroboskopischen Lampe. Dreht sich das Rad hundertmal in der Sekunde und blitzt die Lampe genau hundertmal während jeder Sekunde auf, so wird das Rad immer



wieder in der gleichen Stellung „angeblitzt". Es scheint zu stehen. Dreht sich das Rad etwas langsamer, so ist der schwarze Punkt bei jeder Umdrehung dem Blitz gegenüber ein Stückchen zurück. Das Rad scheint sich langsam rückwärts zu drehen. Ist seine Drehzahl etwas größer als der Blitzrhythmus, dreht es sich scheinbar langsam vorwärts.

Ein Film besteht aus vielen Tausenden von Einzelbildern, von denen in jeder Sekunde 24 aufgenommen und später vorgeführt werden. Besitzt ein Rad gerade die Drehzahl 24 U/s, so sehen wir es „stehen", da es immer in der gleichen Stellung fotografiert wurde. Bei wenig größerer Drehzahl dreht es sich langsam vorwärts, bei wenig geringerer aber rückwärts.

Beim Blitzlicht-Stroboskop wird diese Erscheinung bewußt ausgenutzt. Sein wichtigster Bestandteil ist eine Lampe, die rhythmisch aufblitzt. Der Takt des Aufleuchtens läßt sich in weiten Grenzen verändern, seine Frequenz wird an einer Skala angezeigt. Das Stroboskop ist denkbar einfach zu handhaben: Man verändert den Blitzrhythmus so lange, bis die Welle, deren Drehzahl gemessen werden soll, scheinbar stillsteht. Dann stimmen Blitzrhythmus und Drehzahl überein (scheinbarer Stillstand tritt allerdings auch ein, wenn der Blitzrhythmus zum Beispiel halb so groß wie die Drehzahl ist; man muß daher die Drehzahl vorher abschätzen oder mit möglichst rascher Blitzfolge beginnen). Die Drehzahl kann unmittelbar an der Skala abgelesen werden. Der bestechendste Vorteil dieses Verfahrens ist, daß zwischen Welle und Meßgerät keinerlei „mechanische" Verbindung hergestellt zu werden braucht. Man kann daher die Drehzahl von Maschinen sehr schnell und ohne irgendeinen Eingriff messen.

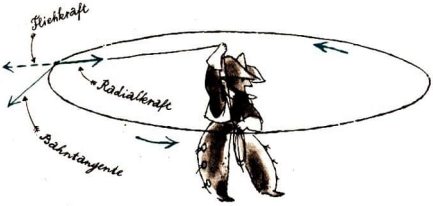
Es wird weitergedreht

Im Trägheitsgesetz wird festgestellt, daß ein Körper auch jeder Richtungsänderung einen Widerstand entgegensetzt. Wir haben das schon oft genug gespürt: Sitzen wir in einem Fahrzeug, das einen Bogen beschreibt, so scheint uns jemand nach außen, „aus der Kurve" zu ziehen. Diesen Jemand nennen wir Fliehkraft oder auch Zentrifugalkraft. Sie kommt nicht etwa „von außen", sondern ist der Trägheitswiderstand, mit dem die Masse unseres Körpers sich der Richtungsänderung widersetzt.

Ein Trägheitswiderstand „gehört" zur beschleunigten Bewegung; tatsächlich läßt sich beweisen, daß jede Bewegung auf gekrümmter Bahn beschleunigt ist: Der Körper „fällt" gewissermaßen fortwährend in Richtung des Krümmungszentrums der Kurve.

Wollen wir die Wirkung der Fliehkraft aufheben und auch in der Kurve ruhig sitzenbleiben, so müssen wir eine der Zentrifugalkraft an Größe gleiche, aber *in* die Kurve gerichtete Kraft aufbringen – etwa, indem wir uns festhalten. Diese Kraft heißt Radialkraft (oder auch Zentripetalkraft).

Am einfachsten sind diese Verhältnisse an einem Stein zu studieren, den wir an einer Schnur im Kreis herumschleudern. Eine Radialkraft, als Zugkraft im Faden wirksam, zwingt den Stein auf eine Kreisbahn. Er „widersetzt" sich dieser Bewegung durch eine der Radialkraft an Größe gleiche, aber nach außen gerichtete Fliehkraft. Solange der Stein kreist, befinden sich beide Kräfte im Gleichgewicht. Zerschneiden wir die Schnur (oder reißt sie), so entfällt die Radialkraft; der Stein wird nicht mehr „abgelenkt", und infolgedessen fällt mit der Radialkraft auch die Zentrifugalkraft weg. Die Folge: Der Stein fliegt mit gleichbleibender Geschwindigkeit (bei Nichtbeachtung des Luftwiderstandes und der Erdanziehung) in der Richtung weiter, die er im



Augenblick des Ausfallens der Kräfte hatte, also in der Richtung der Bahntangente. Es ist nicht, wie man oft hört oder liest, die Zentrifugalkraft, die den Stein fortschleudert. Im Gegenteil: Nach dem Ausfallen von Radial- und Fliehkraft setzt er nur seine „natürliche" geradlinige Bewegung fort.

Die Radialkraft muß keineswegs durch ein Seil oder eine andere feste Verbindung dargestellt sein. Sie kann auch durch die allgemeine Massenanziehung vertreten werden. Das ist bei allen umeinander kreisenden Himmelskörpern der Fall; auch künstliche Erdtrabanten befinden sich im Gleichgewicht zwischen Fliehkraft und Erdanziehung.

Daß die Fliehkraft an allen Teilen eines Körpers nach außen zieht, läßt sich recht einfach zeigen: Bringen wir einen auf einem Rad liegenden Riemen auf hohe Umlaufgeschwindigkeit und werfen wir ihn mit einem Ruck zur Seite ab, so läuft er steif wie ein Reifen über den Tisch und überspringt sogar Streichholzschachteln und andere kleine Hindernisse. Die nach außen wirkenden Zentrifugalkräfte spannen ihn. Glitt früher in einer Maschinenhalle ein rasch laufender, schwerer Treibriemen ab, so kam es vor, daß er durch die Halle raste und Menschen oder Maschinen gefährdete.

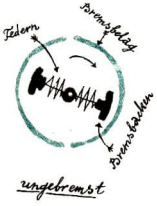
Die Fliehkraft wächst mit zunehmender Masse des bewegten Körpers. Außerdem gilt: Je „enger" eine Kurve, je kleiner der Radius einer Kreisbewegung ist, desto größer ist die Zentrifugalkraft. Vor allem aber wirkt sich die Drehzahl des kreisenden Körpers aus. Ihre Verdopplung vervierfacht die Fliehkraft, eine Verdreifachung verneunfacht sie. Daß mitunter schon eine geringe Geschwindigkeitsüberschreitung ausreicht, um ein Fahrzeug aus der Kurve zu schleudern, ist darauf zurückzuführen; daß umlaufende Maschinenteile bei unzulässigem Anwachsen der Drehzahl unter Umständen bersten, ist ebenfalls eine Folge der mit der Geschwindigkeit rasch steigenden Fliehkraft.

Damit sind wir bereits bei den Anwendungen der Zentrifugal- und Radialkraft: Schwere Drehteile, wie die Laufräder von Turbinen oder die Läufer großer Generatoren und Motoren, werden zur Prüfung in einer „Schleudergrube" so schnell gedreht, daß die Fliehkräfte sich der Belastungsgrenze nähern. Materialfehler führen dadurch bereits in der Schleudergrube zum Bruch, eine spätere Zerstörung kostspieliger Aggregate wird vermieden. Auch die Schraubenblätter von Hubschraubern werden ähnlich geprüft, treten doch während des Betriebes an ihren Enden Kräfte von mehr als 50 000 kp auf.

Ein klassisches Beispiel für die Anwendung der Fliehkraft ist der Zentrifugalregulator. Er stellt, indem er den Lauf einer Maschine nicht nur überwacht, sondern auch selbsttätig steuert, gleichzeitig eines der einfachsten und ältesten Elemente der Regeltechnik dar. Das Bild zeigt eine von einer Dampfmaschine (bei ihr fand der Zentrifugalregulator zuerst Anwendung) angetriebene Welle mit zwei an beweglichen Armen hängenden Gewichten. Die Arme werden wie die Gondeln eines Kettenkarussells durch die an den Massen auftretenden Fliehkräfte mehr oder weniger nach außen geschwenkt – je nachdem, wie schnell sich die Welle dreht. Über die Verbindungsstücke wird eine auf der Welle sitzende Muffe verschoben. Sie steuert ein Hebelsystem, das mit der Drosselklappe für die Dampfzufuhr verbunden ist. Überschreitet die Drehzahl der Maschine einen bestimmten Wert, so drosselt der Zentrifugalregulator die Dampfzufuhr, die Drehzahl sinkt; die Drosselklappe wird dadurch wieder weiter geöffnet.

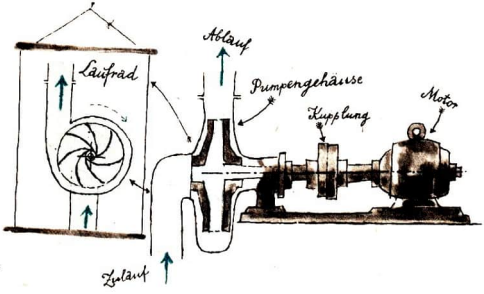
Daß man das Hebelsystem auch dazu benutzen kann, auf einer Skala unmittelbar die Drehzahl anzuzeigen, bedarf keiner Erörterung. Zahlreiche Tachometer arbeiten nach diesem Prinzip.

In älteren Grammophonlaufwerken und Spielzeuglokomotiven mit Federwerk befindet sich häufig eine „Fliehkraftbremse" zur Geschwindigkeitsregulierung. Zwei Metallstücke werden bei zu hoher Drehzahl als Bremsbacken an einen Bremsbelag gedrückt und setzen die Drehzahl herab.



„Zentrifugen" sind uns hauptsächlich aus Molkereien bekannt, doch werden sie auch sonst häufig angewandt, wenn Stoffe verschiedener Dichte aus einer Flüssigkeit abzuscheiden sind. Man versetzt die Flüssigkeit in sehr rasche Umdrehung – Drehzahlen bis 2000 Umdrehungen je Sekunde

sind nicht außergewöhnlich. Die Fliehkräfte sind bei den Teilchen der höchsten Masse am größten, da die Fliehkraft mit der Masse eines Körpers wächst. Diese Teilchen werden nach außen gedrängt, während sich diejenigen geringerer Masse in der Nähe der Achse sammeln. So fließt zum Beispiel in der Milchzentrifuge die Magermilch außen ab, während der spezifisch leichtere Rahm in der Mitte abgezapft wird.
Trockenschleudern für Wäsche nutzen gleichfalls die Fliehkraft. Die Wäsche wird in einem mit zahlreichen Wanddurchbrüchen versehenen Zylinder in rasche Drehung versetzt. Die Wassertröpfchen werden durch die Fliehkräfte nach außen geschleudert und fließen aus den Durchbrüchen ab.
Ähnlich arbeitet die Kreiselpumpe, ein in vielen Betrieben verwendetes Gerät. Im Pumpengehäuse rotiert ein Flügelrad. Es nimmt das im Gehäuse befindliche Wasser mit, das durch die Fliehkraft nach außen und in das Ablaufrohr gedrückt wird. In Achsnähe entsteht dadurch ein „Sog", der dazu benutzt wird, neues Wasser anzusaugen. Da die Kreiselpumpe keine empfindlichen Ventile enthält, ist sie auch zum Pumpen von verschlammten oder verunreinigten Flüssigkeiten gut geeignet.
Schließen wir dieses Kapitel mit der Betrachtung der unter dem Namen „Zyklon" bekanntgewordenen Luftreinigungsanlage ab. Staubhaltige Luft, beispielsweise die Rauchgase von Kohlenstaubfeuerungen, strömt mit hoher Geschwindigkeit in den Zylinder des Staubabscheiders. Dort wird sie in wirbelnde Bewegung versetzt, wobei die Staubteilchen nach außen geschleudert werden. Sie prallen auf die Wände, werden abgebremst und fallen nach unten. Die gereinigte Luft wird durch ein in der Zylinderachse verlaufendes Rohr abgesaugt.



Kreiselpumpe

Arbeit — wie der Physiker sie sieht

Bereits die Überschrift zieht diesem Kapitel eine Grenze: Nicht von der Arbeit schlechthin, die uns Mensch werden ließ und seitdem mit der Existenz und der Entwicklung der Menschheit unlösbar verknüpft ist, wollen wir in diesem Kapitel sprechen. Hier geht es um „physikalische Arbeit" oder, noch enger gefaßt, um „mechanische Arbeit". Es ist dies Arbeit, die sich mit physikalischen Methoden und Begriffen eindeutig fassen läßt, Arbeit, die mit menschlicher und tierischer Muskelkraft ebenso verrichtet werden kann wie mit mechanischen Vorrichtungen oder Motoren.

Eine der einfachsten und zugleich häufigsten Arbeitsarten ist „Hubarbeit": Ein Kran hebt Kisten oder Bauteile, ein Fahrstuhl befördert seine Passagiere zum Dachgarten, wir schleppen schnaufend die gefüllten Kohleneimer die Kellertreppe empor. Dies alles ist Hubarbeit, und gerade das letzte Beispiel ist dazu angetan, sie uns auch größenmäßig nahezubringen.

Je schwerer die Last und je größer die Höhe, desto mehr Mühe macht uns der Transport. Wer im vierten Stock wohnt, hat sich beim Kohletragen bedeutend mehr anzustrengen als sein Mitbewohner im ersten Stock; und das Hochtragen von 15-kp-Eimern erfordert doppelt soviel Arbeit wie das von Eimern, die nur 7,5 kp fassen.

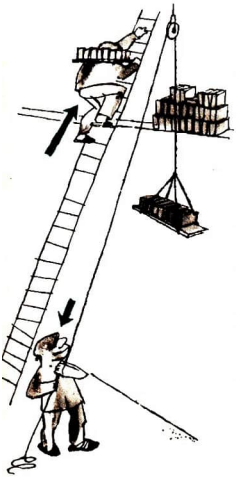
Das alles sind Erfahrungen, die jeder schon gesammelt hat, und so wird es uns nur natürlich erscheinen, wie der Physiker die Hubarbeit errechnet:

$$\text{Hubarbeit} = \text{Last} \cdot \text{Höhe} \qquad \mathcal{A} = \mathcal{L} \cdot h \quad [\text{kpm}]$$

Eine besondere Arbeitseinheit wollen wir, obwohl der Physiker solche Einheiten kennt, nicht einführen. Lasten messen wir in kp, Höhen in m. Die Formel verlangt, daß die Last mit der Höhe multipliziert werde. Das ergibt, auf die Einheiten übertragen, die Arbeitseinheit „Kilopondmeter" (kpm).

1 kpm wird also vollbracht, wenn 1 kp 1 m hoch gehoben wird; hebt man 5 kp um 2 m, so beträgt die Hubarbeit 10 kpm – es ist die gleiche Arbeit, mit der man 1 kp 10 m oder auch 10 kp um 1 m heben könnte. Fördert ein Kran 50mal am Tage 500 kp aus einer 20 m tiefen Kiesgrube, so hat er eine Arbeit von 500 000 kpm vollbracht; die einzelnen Arbeitsbeträge werden einfach addiert. Besteigen wir einen

800 m hohen Berg, so haben wir bei einem Eigengewicht von 75 kp 60 000 kpm geleistet. Übrigens geht aus der Arbeitsformel hervor, daß, was das Bergsteigen anbelangt, der Dicke ungleich schlechter dran ist als der Dünne.



Trägt ein Arbeiter 25 kp Ziegel auf einen 20 m hohen Bau, so hat er – weit mehr Arbeit geleistet als 500 kpm. Er muß nämlich nicht nur die Ziegel hochtragen – die dazu notwendige Arbeit betrüge in der Tat 500 kpm – sondern auch sich selbst. Nehmen wir wieder an, er wöge 75 kp, so beträgt die dazu nötige Arbeit 1500 kpm; insgesamt also entsteht ein Arbeitsaufwand von 2000 kpm, und nur der vierte Teil davon ist wirklich nützliche Arbeit.

Benutzt der Arbeiter eine am Boden aufgestellte Winde, so beträgt, von den Verlusten in der Winde abgesehen, der Arbeitsaufwand tatsächlich nur 500 kpm. Bei gleicher Anstrengung können viermal soviel Ziegel befördert werden wie mit der „altväterlichen" Methode des Hochtragens. Gibt es ein deutlicheres Beispiel dafür, wie oft schon einfache Mechanisierungsmaßnahmen die Arbeitsproduktivität erhöhen?

Die Winde hat allerdings nicht etwa die eigentliche Hubarbeit verringert. Die Arbeitsersparnis rührt ausschließlich daher, daß mit der Winde nur noch nützliche Arbeit geleistet wird und das sogenannte „tote Gewicht" (eine Bezeichnung, die in unserem Beispiel allerdings einen Lebenden trifft) wegfällt. Nicht immer läßt sich das tote Gewicht völlig beseitigen, aber überall im Transportwesen ist man bestrebt, es möglichst zu verringern. Wir können heute beobachten, daß Schüttgüter wie Sand und Schotter in zunehmendem Maße über Bandförderer transportiert werden. Das hat einmal den Vorteil, daß der Transport kontinuierlich erfolgt. Zum anderen aber entfällt das Totgewicht zahlreicher einzelner Transportbehälter.

Im Steinkohlenbergbau hat das Prinzip „Verringerung des Totgewichtes" gleichfalls Einzug gehalten. Früher wurden die beladenen Hunte in den Förderkorb geschoben, zur Erdoberfläche gehoben, entleert und wieder in den Schacht eingefahren. Diese „Gestellförderung" war wegen des Wagentransportes umständlich und machte ein ständiges Heben von Totgewicht (nämlich der Hunte) notwendig. Heute wendet man daher gern die sogenannte Skipförderung an. Bei ihr bleiben die Hunte im Schacht. Sie werden in einen Verladebunker entleert, aus dem automatisch ein verhältnismäßig leichtes, im Förderschacht befindliches Transportgefäß gefüllt wird. Es faßt etwa 10 Tonnen Kohle.

Vielleicht ist Ihnen bei den genannten Beispielen bereits etwas aufgefallen: Es war immer nur von der Höhe die Rede, wir haben aber keinen Satz darauf verschwendet, zu sagen, auf welchem Wege gehoben wurde. Es gibt bequeme und unbequeme Treppen; es führen auf den gleichen Berg steile und sanft ansteigende Wege. Warum kommt das in unseren Beispielen nicht zum Ausdruck? Der Grund ist sehr einfach: Die Hubarbeit wird tatsächlich nur durch die Last und die Höhendifferenz bestimmt. Wie diese Höhendifferenz durchlaufen wird, spielt (wenn keine anderen Verluste auftreten) keine Rolle. Die Hubarbeit ist, physikalisch gesehen, die gleiche, ob wir mit dem Kohleneimer die Treppe emporsteigen oder an der senkrechten Feuerleiter hochklettern.

Daß dies in scheinbar argem Widerspruch zu unserer täglichen Erfahrung steht, ist kein Fehler der Physik. Es beweist nur einmal mehr, daß der Mensch keine „Maschine" ist. Die physikalischen Formeln können und dürfen keine Rücksicht auf die Eigenschaften und Besonderheiten unseres Körpers nehmen.

Es läßt sich nun zeigen – das ist ebenfalls eine alltägliche Erfahrung –, daß auch Arbeit notwendig ist, um einen Körper auf der Erde fortzubewegen.

Wieder hängt diese Arbeit von zwei Größen ab: Von der Wegstrecke, über die ein Körper zu bewegen ist, und von der Kraft, die dabei in Richtung der Bewegung aufgewandt werden muß. Doppelter Weg bedeutet wieder doppelte Arbeit, dreifache Kraft dreifache Arbeit.

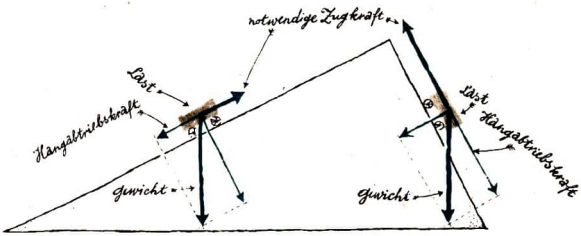
Man kann deshalb die Formel für die Hubarbeit verallgemeinern:

Arbeit = Kraft (in Wegrichtung) · Weg

$$\mathcal{A} = \mathcal{P} \cdot s \quad [\text{kpm}]$$

Ist zum Fortbewegen eines Fahrrades eine Kraft von 8 kp notwendig und fährt man 10 km weit, so beträgt der Arbeitsaufwand 80 000 kpm. Eine Güterzuglokomotive, die einen Zug mit einer Kraft von 12 000 kp über eine Strecke von 50 km zieht, hat 600 Millionen kpm geleistet.

„In Wegrichtung" – daraus erklärt sich auch die merkwürdige Tatsache, daß die Hubarbeit nur von der Höhendifferenz abhängt. Die Abbildung auf S. 78 soll uns helfen, das zu verstehen: Die gleiche Last kann über zwei Wege auf den „Gipfel" der schiefen Ebene geschafft werden. Auf dem allmählich ansteigenden Hang ist die „in Richtung des Weges" nötige



Kraft gering, wie es sich aus dem Kräfteparallelogramm sofort ergibt. Dafür ist der Weg verhältnismäßig lang. Am steilen Hang dagegen ist der Weg sehr kurz, statt dessen ist die aufzuwendende Kraft sehr groß (vgl. S. 50). Würden wir Zahlenwerte einsetzen und unseren Versuch an den verschiedenartigsten Hängen wiederholen, so erhielten wir immer wieder als Ergebnis: Das Produkt aus Kraft und Weg bleibt in jedem Fall gleich. Stets ist dieselbe Arbeit aufzuwenden, ohne Rücksicht darauf, ob der Hang steil, sanft oder „treppenartig" aussieht.

Erinnert das nicht an die goldene Regel der Mechanik? Entsinnen wir uns: Bei der losen Rolle brauchten wir die halbe Kraft, aber den doppelten Weg. Bei Winden, Hebeln und Flaschenzügen kamen wir zu entsprechenden Resultaten. Alle diese Vorrichtungen sparten Kraft, nicht aber Arbeit; denn auch bei ihnen blieb das Produkt aus Kraft und Weg immer gleich!

„Arbeit kann nicht eingespart werden." Das ist die goldene Regel der Mechanik in etwas abgewandelter Form. In ihr verbirgt sich – wir erwähnten es bereits – eines der wichtigsten und weitreichendsten Naturgesetze überhaupt. Es ist der Satz von der Erhaltung der Energie, den wir später noch genauer kennenlernen werden.

Von der Größe, vom „Wert" der Arbeitseinheit Kilopondmeter können wir uns schnell überzeugen, indem wir selbst Hubarbeit leisten. Bekannt, wenigstens dem Namen nach, ist uns auch eine andere Arbeitseinheit. Sie dominiert in der Elektrotechnik und heißt „Kilowattstunde" (kWh) (vgl. S. 209). Die elektrische Arbeit einer Kilowattstunde enspricht einer mechanischen Arbeit von 367 000 kpm. Das ist zunächst nur eine Zahl, doch sie erhält eine überraschende Bedeutung, wenn wir sie einmal auf unsere Beispiele beziehen. Beim Be-

steigen des 800 m hohen Berges leisteten wir 60 000 kpm an mechanischer Arbeit. Ein Elektromotor, der uns hochzöge, verbrauchte noch nicht einmal $^1/_6$ kWh. Unsere Bergbesteigung würde, den üblichen Strompreis von 0,08 DM/kWh vorausgesetzt, nur für 1,3 DPf Strom kosten!
Dieses Beispiel läßt uns unwillkürlich fragen, welche mechanische Arbeit ein Mensch überhaupt vollbringen kann. Das Ergebnis ist erstaunlich: Ein Mensch, der Tag für Tag hart körperlich arbeitet, bringt es im Jahr (300 Arbeitstage) auf etwa 100 kWh. Ein Motor gleicher mechanischer Leistungsfähigkeit würde in dieser Zeit für 8 DM Strom verbrauchen.
Es sei nicht verschwiegen, daß wir uns mit derartigen Spekulationen hart an der Grenze des Zulässigen bewegen: Der Mensch ist eben keine Winde, kein Flaschenzug, keine Maschine – auch wenn es durch Jahrtausende das Streben der herrschenden Klassen war, große Menschengruppen dazu zu erniedrigen.
Bleiben wir trotzdem noch ein wenig bei diesen Zahlen! Wenn bereits 1956 in unserer Republik je Kopf der Bevölkerung 1760 kWh an elektrischer Arbeit erzeugt und verbraucht wurden, so heißt das nicht mehr und nicht weniger, als daß jedem Bürger unseres Landes etwa 18 „Helfer" zur Seite standen, die für ihn Motoren trieben, Räume heizten, Fahrzeuge bewegten, baggerten, bauten, leuchteten, bügelten, kochten und ihn heilten. 1965, am Ende des Siebenjahrplanes, werden es 63 Milliarden kWh sein, die in der Deutschen Demokratischen Republik gewonnen werden, das sind 36 „Helfer" je Kopf der Bevölkerung. Allein mit der elektrischen Energie, die das Kombinat „Schwarze Pumpe" liefern wird, könnten in jedem Jahr 1000 Cheopspyramiden aufgebaut werden!

Es geht um Sekunden

Stellen Sie sich vor, Sie seien Konstrukteur und hätten einen Aufzug entworfen, um den Materialtransport in Ihrem Betrieb zu erleichtern. Nur eine Frage bleibt noch offen: Welchen von den beiden verfügbaren Motoren sollen Sie wählen, den, der eine Last von 500 kp in einer halben Minute bis ins oberste Stockwerk hebt, oder den, der dafür eine ganze Minute braucht? Wahrscheinlich entscheiden Sie sich für den, der „schneller" arbeitet. Doch warum eigentlich? Die Hubarbeit bleibt sich doch in jedem Fall gleich!

Wir erkennen hier ein wichtiges Merkmal des physikalischen Arbeitsbegriffes: Die Zeit ist „nicht mit drin". Wenn der Physiker sich für eine aufgewendete Arbeit interessiert, ist es ihm zunächst völlig gleichgültig, ob ihre Verrichtung eine Minute, eine Stunde oder zehn Jahre dauert.

Häufig kommt es aber – nicht nur in der Physik – sehr wohl auf die Zeit an, die für eine Arbeit gebraucht wird. In der Technik, in der Volkswirtschaft ist das immer der Fall. Selbstverständlich ist es von größter Bedeutung, ob eine Fördereinrichtung eine bestimmte Menge Transportgut in einer, in zwei oder in vier Stunden hebt. Selbstverständlich kommt es darauf an, ob ein Elektromotor mit allen dazu notwendigen Arbeiten in 12, 18 oder 22 Stunden produziert werden kann. Die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft wurde letzten Endes erst dadurch möglich, daß es gelang, die für bestimmte Arbeiten notwendige Zeit mehr und mehr zu vermindern.

Um eine physikalische Arbeit und die für sie notwendige Zeit miteinander zu verknüpfen, führte man den Begriff der Leistung ein. Wir verstehen darunter das Verhältnis der Arbeit zur Zeit, in der sie verrichtet wurde. Das heißt: Je mehr physikalische Arbeit in einer bestimmten Zeitspanne vollbracht wird, desto größer die Leistung. Oder auch: Je weniger Zeit für eine Arbeit erforderlich ist, desto größer die Leistung. Als Formel geschrieben:

$$\mathcal{L} = \frac{\mathcal{A}}{t} \quad \left[\frac{kpm}{s}\right]$$

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$$

Setzen wir, wie üblich, die Arbeit in kpm ein und wählen wir als Zeiteinheit die Sekunde, so ergibt sich sofort die Leistungseinheit 1 kpm/s. Diese Leistung vollbringen wir, wenn wir in einer Sekunde 1 kp 1 m hoch heben oder einen Gegenstand mit einem Kraftaufwand von 1 kp um 1 m verrücken. Heben wir 50 kp (den alten „Zentner") in 2 s 3 m hoch, so beträgt die Leistung 75 kpm/s.

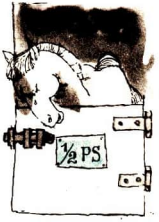
$$\mathcal{L} = \frac{50 \cdot 3}{2} = 75 \left[\frac{kpm}{s}\right]$$

Die Leistungseinheit kpm/s ist recht klein. Meistens haben wir es in der Technik mit viel höheren Leistungen zu tun. Es ist infolgedessen ratsam, auch eine größere Leistungseinheit einzuführen. Eine solche Einheit, die zwar noch allgemein bekannt ist, heute aber mehr und mehr verschwindet, ist die Pferdestärke (PS).

Daß – einmalig in der Physik – ein Tier zur Festlegung einer Einheit herhalten mußte, hat geschichtliche Gründe: Ehe die

Dampfmaschine erfunden und einsatzbereit war, wurden weitgehend Zugtiere als „Motoren" verwendet. In den englischen Kohlengruben zum Beispiel mußten Pferde Tag und Nacht schwer arbeiten, um das Wasser aus den Stollen und Schächten zu pumpen. Als die ersten Dampfmaschinen gebaut waren und verkauft werden sollten, mußte die Überlegenheit dieser neuen Kraftquelle schlagend bewiesen werden. Das war schon deswegen nötig, weil man den Unmengen an Kohle verbrauchenden „eisernen Engeln" zunächst sehr skeptisch gegenüberstand. Was lag näher, als die Leistungsfähigkeit der neuen Motoren, der Dampfmaschinen, mit der des Pferdes zu vergleichen?

Zu diesem Zweck mußte zunächst genau festgestellt werden, was ein Pferd überhaupt leistet. Man spannte Pferde an einen Pumpengöpel und maß die Wassermenge, die sie in einer bestimmten Zeit hochpumpten. Die dabei ermittelte Leistung betrug – in heutigen Einheiten ausgedrückt – etwa 75 kpm/s. Man setzte daher als „Pferdestärke" (PS) die Leistung von 75 kpm/s fest.



Wahrscheinlich haben die Grubenbesitzer, um die Dampfmaschinen möglichst billig zu bekommen, recht robuste Gäule für die Versuche eingesetzt. Auch das kräftigste Pferd kann nämlich kaum länger als eine halbe Stunde 1 PS leisten; die „wirkliche" Pferdestärke, die Dauerleistung eines Pferdes, beträgt weniger als 0,5 PS! Genützt hat im übrigen der Trick wenig – schon beim ersten Versuch zeigte sich die Dampfmaschine den Pferden weit überlegen.

Heute hat das PS nur noch historischen Wert, und die internationalen Gremien für die Festlegung von Maßen und Gewichten empfehlen, es nicht mehr zu benutzen.

Weit verbreitet ist eine andere Leistungseinheit, die wir von den Bezeichnungen auf elektrischen Geräten kennen: das Watt (W) oder das Kilowatt (kW) – 1000 W entsprechen 1 kW.

Stellen wir die zahlenmäßigen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Leistungseinheiten zusammen:

1 PS	entspricht	0,736 kW	oder	75 kpm/s,
1 kW	entspricht	1,36 PS	oder	102 kpm/s,
1 kpm/s	entspricht	9,81 W	oder	0,00981 kW.

Was leisten eigentlich große Maschinen? Eine Personenzuglokomotive der Baureihe 23-10 kommt auf maximal 1980 PS. Fast ebensoviel leistet jeder der beiden Motoren, die in die

„IL 14" unserer Lufthansa eingebaut sind. Die Triebwerke von Flugbooten bringen es auf 40 000 PS. Das ist wiederum wenig gegenüber den Maschinenleistungen großer Schnelldampfer: 170 000 „Pferde" bewegen den Rumpf der „Queen Mary", während es bei der „Europa" nur 125 000 waren.
Sowjetische Techniker konstruierten Generatoren, die 300 000 kW leisten; es sind die stärksten Generatoren der Welt. Selbst ihre Leistung aber erscheint gering, verglichen mit den vielen Millionen Kilowatt, die notwendig sind, um eine kosmische Rakete auf die erforderliche Geschwindigkeit zu bringen.
Und wie steht es mit uns? Wie groß ist die Leistungsfähigkeit unserer Muskeln? Überlegen wir selbst: Sicher ist es möglich, in einer Sekunde 1 m oder gar 2 m auf einer Treppe emporzuhasten. Wiegen wir 75 kp, so haben wir dabei 1 PS beziehungsweise 2 PS geleistet. Daran ist zwar nicht zu rütteln, aber diese Leistung halten wir nur einige Sekunden durch, dann müssen wir gründlich verschnaufen. Der Mensch kann durchaus Leistungen von 1 PS und mehr vollbringen, aber es sind ausgesprochene Augenblicksleistungen. Springer, Boxer, Gewichtheber – sie sind wirklich „stärker als ein Roß", aber immer nur für eine kurze Zeitspanne.
Um die menschliche Dauerleistung ist es recht bescheiden bestellt. Sie beträgt $^1/_{12}$ bis $^1/_{10}$ PS, und auch das nur für wenige Stunden. Das war so lange ein großer Mangel, als der Mensch seine eigene Kraftquelle war. Inzwischen haben wir – dank der nicht in Kilopondmetern faßbaren Tätigkeit des Gehirns – unsere Leistungsfähigkeit vertausend-, nein, vermillionenfacht. Niemand braucht daher Minderwertigkeitskomplexe zu bekommen, weil die Leistung seiner Muskeln nicht größer ist als die der Glühbirne in einer Leselampe . . .

Vorsicht! Frisch gebohnert!

„. . . Verkehr in den Bezirken Suhl und Karl-Marx-Stadt durch Schneeglätte behindert. Es wird gestreut . . ." Entsinnen Sie sich solcher Sätze? Sie kehren häufig in Straßenzustandsberichten wieder, die im Winterhalbjahr täglich von unseren Rundfunksendern ausgestrahlt werden. Daß im Winter gestreut werden muß, ist nun gewiß nichts Neues; jeder weiß auch, warum es notwendig ist: Auf festgefahrenem oder festgetretenem Schnee oder auf Eis rutscht man leicht, durch

das Streuen aber wird die Reibung zwischen Rad und Boden, zwischen Schuhsohle und Schnee vergrößert; man kann sich wieder sicher bewegen.

„Reibung"! Das ist es, das Stichwort dieses Kapitels! Zwar haben wir es schon mehrmals erwähnt, doch stets in Formulierungen wie „von der Reibung sei vorerst abgesehen" oder „unter Vernachlässigung der Reibungsverluste".

Wir haben bisher getan, als gäbe es keine Reibung. Das war durchaus berechtigt, denn bei den bis jetzt von uns untersuchten Erscheinungen war die Reibung eine unerwünschte Nebenerscheinung, die wir erst einmal übergehen mußten, um zum „Kern" vorzustoßen.

In Wirklichkeit gibt es keine Bewegung, die ohne Reibung verläuft. Eine Kiste soll weggeschoben werden. Wir haben dabei nicht nur ihre Trägheit, sondern auch die Reibung zwischen Kiste und Boden zu überwinden. Kaum ist der Winter ins Land gekommen, so holen jung und alt Rodelschlitten und Skier hervor. Daß man überhaupt rodeln kann, verdanken wir der geringen Reibung zwischen Schlittenkufen und Schnee. Anders der Skiläufer: Beim Aufstieg möchte er die Reibung zwischen Ski und Schnee möglichst vergrößern. Er benutzt Steigwachs oder schnallt sich Seehundfelle unter die Bretter. Bei der Abfahrt dagegen soll sich die Reibung möglichst wenig bemerkbar machen – er greift zum Gleitwachs.

Eine Maschine fällt aus, weil sie nicht richtig geschmiert wurde: Die zunehmende Reibung führte zu übermäßiger Wärmeentwicklung und zur Zerstörung der Lager.

Setzen wir die Liste der Beispiele nicht fort – jeder Leser könnte das selbst tun. Wichtiger ist: Wie entsteht überhaupt Reibung?

Immer macht sich die Reibung als Gegenkraft bemerkbar, die die Bewegung aufeinander gleitender oder rollender Körper behindert. Reibung entsteht vor allem dadurch, daß die Oberflächen der Körper nicht „ideal glatt" sind. Unter dem Mikroskop sind auf ihnen Täler und Berge zu erkennen, die bei aufeinanderliegenden Flächen vielfältig ineinandergreifen. Der „Reibungswiderstand" ist vor allem die Kraft, die notwendig ist, um diese „Verzahnungen" zu lösen.

Die Unebenheiten sind allerdings nicht einzige Ursache der Reibung. Auch zwei auf Hochglanz polierte Stahlflächen gleiten nämlich keineswegs reibungslos aufeinander. Wir müssen daher annehmen, daß auch Anziehungskräfte zwischen den einander gegenüberliegenden Molekülen der

Körper, sogenannte Adhäsionskräfte, an der Reibung beteiligt sind. Wir werden an anderer Stelle (vgl. S. 100) noch ausführlich auf sie eingehen.

Wovon hängt die Reibung ab? Wie läßt sich die Kraft bestimmen, die den Reibungswiderstand überwindet? Bleiben wir zunächst bei „gleitender" Reibung, bei der Flächen aufeinander verschoben werden. Hier spielen zunächst das Material und die Oberflächenbeschaffenheit eine Rolle. Stahl auf Holz rutscht anders als Stahl auf Sand. Die Besonderheiten des Materials berücksichtigt der „Reibungskoeffizient", die Reibungszahl μ (gesprochen: mü), die man für die wichtigsten Stoffe ermittelt und in Tabellen festgehalten hat.

Außerdem hängt der Reibungswiderstand von der senkrecht auf die Unterlage wirkenden Kraft N des gleitenden Körpers ab; bei waagerechter Unterlage ist sie dem Gewicht gleich. Je schwerer eine Kiste oder ein Schrank ist, desto mehr Mühe macht es, ihn wegzurücken. Es gilt das Gesetz:

$$\mathcal{R} = \mu \cdot \mathcal{N} \quad [kp]$$

Reibungswiderstand =
Reibungszahl · Kraft senkrecht auf die Unterlage

Als Reibungszahl von Stahl auf Eis wird zum Beispiel für gleitende Reibung $\mu = 0{,}014$ angegeben. Der Reibungswiderstand beträgt daher bei einem 100 kp schweren, über Eis zu ziehenden Schlitten: $R = 0{,}014 \cdot 100 = 1{,}4$ [kp].

Diese 1,4 kp sind notwendig, um den Schlitten in gleichmäßiger Bewegung zu halten.

Merkwürdig scheint auf den ersten Blick, daß die Reibung nicht durch die Größe der aufeinander gleitenden Flächen beeinflußt wird. Es ist gleichgültig, ob wir eine Kiste auf ihrer Schmal- oder auf ihrer Längsseite schieben. Man kann sich das so erklären: Liegt die Kiste auf einer „großen" Fläche, so verteilt sich die auf die Unterlage ausgeübte Kraft – der Auflagedruck (vgl. S. 29) ist gering, die Verzahnung der Unebenheiten geht nicht allzu „tief". Stellen wir die Kiste auf eine „kleine" Fläche, so wächst zwar der Druck und damit die Intensität der Verzahnungen – dafür aber nimmt die Zahl der miteinander in Wechselwirkung stehenden Unebenheiten ab.

Erwähnen wir noch die sogenannte „Haftreibung". Soll ein Körper aus der Ruhe in Bewegung versetzt werden, so ist zunächst ein etwas größerer Reibungswiderstand zu überwinden als während der zügigen Fortbewegung, weil die Unebenheiten gewissermaßen ineinander eingerastet sind.

Diese Haftreibung ist etwas größer als die Gleitreibung. Das ist häufig zu beobachten: Ein Wagen, eine Kugel, ein Ball beginnt auf abschüssigem Wege mitunter nur zu rollen, nachdem wir die Haftreibung mit einem kleinen „Schubs" überwunden haben. Erst dann reicht die Hangabtriebskraft zur Überwindung des Reibungswiderstandes aus. Auch die Haftreibung hängt vom Werkstoff ab und läßt sich zahlenmäßig ausdrücken.

Eine andere Form der Reibung ist die „Rollreibung". Sie macht sich an Körpern bemerkbar, die auf ihrer Unterlage rollen. Auch für sie läßt sich ein Reibungsgesetz aufstellen:

$$\mathcal{R} = \mu_F \cdot \mathcal{N} \quad [\text{kp}]$$

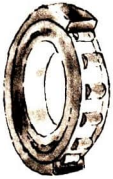
N ist dabei wieder das Gewicht, μ_F der Koeffizient der rollenden Reibung (bei Fahrzeugen nennt man ihn auch „Fahrwiderstandszahl", daher μ_F).

Die Reibungszahl für rollende Reibung ist im allgemeinen viel geringer als die für Gleitreibung. So beträgt die Gleitreibungszahl von Stahl auf Stahl ungefähr 0,15, während der Reibungskoeffizient eines rollenden Eisenbahnwagens (ebenfalls Stahl auf Stahl) nur mit etwa 0,003 anzusetzen ist. Das gleiche Gewicht läßt sich also fünfzigmal leichter wegrollen als wegschieben! Daß wir uns normalerweise mit Fahrzeugen und nicht mit Schlitten fortbewegen, geht auf den großen Unterschied zwischen gleitender und rollender Reibung zurück.

Man trachtet in der Technik meistens danach, den Reibungswiderstand möglichst niedrig zu halten. Dies läßt sich erreichen, indem man die aufeinander gleitenden Flächen „schmiert" und so ihre Unebenheiten ausfüllt. Die Entwicklung brauchbarer Schmiermittel – von denen Fette und Öle am bekanntesten und verbreitetsten sind – ist alles andere als einfach: Sie dürfen die gleitenden Körper nicht chemisch angreifen; sie sollen außerdem eine gewisse Zähigkeit besitzen, so daß sich zwischen den gleitenden Flächen ein hauchdünner Film des Schmiermittels bildet und die Flächen selbst gar nicht in unmittelbare Berührung miteinander kommen. Auch darf ein Schmiermittel im allgemeinen seine Eigenschaften bei Temperaturschwankungen nicht wesentlich verändern.

Besonders deutlich macht sich die Gleitreibung bemerkbar, wenn eine Achse sich zwischen einfachen Lagerschalen dreht. Bei einem solchen „Zapfenlager" können große Reibungsverluste und ein „Heißlaufen" nur durch äußerst sorgfältige Schmierung vermieden werden.

Auch das beste Schmiermittel kann aber die Reibung nicht beliebig vermindern. Deshalb beschreitet man häufig noch



einen anderen Weg: Man ersetzt, wo immer das möglich ist, die Gleitreibung durch rollende Reibung. Das kann bei einer umlaufenden Achse geschehen, indem man zwischen Achse und Lagerschale Kugeln oder Rollen einfügt. Die Achse rollt dann auf den Kugeln, die Kugeln wiederum auf den Lagerschalen. In Kugel- oder Rollenlagern, die ebenfalls geschmiert werden müssen, läßt sich die Reibungszahl auf 0,001 vermindern. Kein Wunder, daß Kugel- und Rollenlager so weit verbreitet sind. Der Mehraufwand für ihre Produktion macht sich durch die verminderten Reibungswiderstände rasch bezahlt.

Es gibt allerdings auch zahlreiche Fälle, in denen eine große Reibung durchaus erwünscht ist. Das gilt zum Beispiel für sämtliche Bremsen, und man hat spezielle Bremsbeläge großer Reibungszahl ($\mu = 0{,}6$ und mehr) entwickelt. Auch das am Anfang dieses Kapitels erwähnte „Streuen" und die Seehundfelle der Skiläufer gehören hierher.

Doch die „gute Seite" der Reibung reicht viel weiter. Versuchen Sie einmal, sich Ihren Tagesablauf ohne Reibung vorzustellen!

Sie könnten sich nicht einmal vom Stuhl erheben; denn schon lägen Sie auf dem Boden! Ohne Reibung fänden die Fußsohlen keinen Halt auf dem Erdboden; und es wäre Ihnen schier unmöglich, einen Schritt zu gehen (bei Glatteis können Sie mitunter eine ungefähre Vorstellung von diesem Zustand bekommen). Auch Fahrzeuge wären sinnlos; sie blieben trotz sausender Räder auf der Stelle stehen!

Doch es geht noch weiter: Nagel einschlagen – aussichtslos! Ohne Reibung würde kein Nagel im Mauerwerk halten. Zigarette anzünden – ausgeschlossen! An der Reibfläche der Streichholzschachtel entstände keine Wärme, das Rädchen eines Feuerzeugs würde keine Funken abschleifen.

Schuhe zubinden – unmöglich! Die Knoten rutschten bei der geringsten Bewegung und Beanspruchung auseinander. Da aber unsere Bekleidung auch nur aus sinnreich verschlungenen und verknüpften Fäden besteht, würde sie uns vom Leibe fallen.

Kampf um Prozente

Die Winde als wirkungsvolles Hilfsmittel zum Lastenheben haben wir in den vorangegangenen Kapiteln gründlich studiert. Sie soll sich jetzt für diese Aufmerksamkeit „revanchieren" und uns helfen, weitere für Physik und Technik wichtige Beziehungen kennenzulernen.

Soll eine Last gehoben werden, so ist dazu eine gewisse Arbeit erforderlich. Wir haben sie bisher stets aus Gewicht und Hubhöhe errechnet. Der dabei erhaltene Wert stellt einen „Idealfall" dar: Er ist unabhängig davon, ob die Winde sinnvoll konstruiert wurde oder nicht; er berücksichtigt nicht, ob sie verrostet oder gepflegt ist.

Leider läßt sich der Idealfall nicht verwirklichen. Niemand wird bezweifeln, daß es sehr wohl auf Bauart und Zustand der Winde ankommt; haben wir doch gerade auf den letzten Seiten erfahren, welche ausschlaggebende Bedeutung bei allen Bewegungen vor allem der Reibung zukommt. Sie „kostet Arbeit", die beim Hochwinden von unseren Muskeln zwar ebenfalls geleistet werden muß, im übrigen aber völlig nutzlos ist. Bei sämtlichen anderen Maschinen ist es ähnlich: Stets ist die zugeführte Arbeit A größer als die „Nutzarbeit" A_n. Die Differenz zwischen zugeführter Arbeit und Nutzarbeit müssen wir als Verlust abbuchen; und offensichtlich arbeitet eine Maschine um so wirkungsvoller, je kleiner diese Differenz ist.

Um diese Beziehungen auch zahlenmäßig ausdrücken zu können, führte man den Begriff des Wirkungsgrades (η, gesprochen eta) ein:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{zugeführte Arbeit}} \qquad \eta = \frac{A_n}{A_z}$$

Der Techniker rechnet häufiger mit Leistungen. Es gelten für sie gleiche Überlegungen wie für die Arbeit, und man schreibt deshalb noch öfter:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \qquad \eta = \frac{N_n}{N_z}$$

Vollbringt eine Maschine eine Nutzarbeit von 500 kpm und beträgt die zugeführte Arbeit 750 kpm, so errechnet sich ein Wirkungsgrad von 0,67, was man häufig auch als $\eta = 67\,\%$

$$\eta = \frac{500}{750} = 0{,}67$$

$\eta = \frac{60}{80} = \frac{3}{4}$ oder 75 %

ausdrückt. Nimmt eine Winde bei einer Nutzleistung von 60 kW 80 kW auf, so beträgt ihr Wirkungsgrad 75 %.
Stets bleibt der Wirkungsgrad kleiner als 1 beziehungsweise als 100 %. Ein Wirkungsgrad von 100 % würde nämlich bedeuten, daß Nutzarbeit und zugeführte Arbeit gleich groß sind – das entspräche aber einer völlig verlustfrei arbeitenden Maschine. Diese kann es schon wegen der immer vorhandenen Reibung nicht geben. Ein Wirkungsgrad von mehr als 100 % gar würde besagen, daß eine Maschine mehr Arbeit vollbringt, als in sie „hineingesteckt" wurde. Auch das ist, wie wir noch untersuchen werden, unmöglich.

Wirkungsgrade einiger technischer Geräte und Maschinen (Durchschnittswerte)

Dampfmaschine	14 %	Wasserturbine	90 %
Dampfturbine	28 %	Elektromotor	80 %
Ottomotor	28 %	Generator	90 %
Dieselmotor	34 %	Transformator	95 %
		Tauchsieder	98 %

Die Dampfmaschine steht in dieser Tabelle an der Spitze – leider; denn die Zahl 14 % bedeutet, daß von 100 Schaufeln Kohle nur 14 wirklich „arbeiten", 86 aber ungenutzt bleiben. Das ist nicht nur teuer, sondern vor allem eine Vergeudung wertvollster Rohstoffe, die für andere Aufgaben weit besser ausgenutzt werden könnten. Auch die übrigen Wärmekraftmaschinen zeichnen sich nicht durch einen hohen Wirkungsgrad aus. Selbst beim Dieselmotor wird nur ein Drittel der im Kraftstoff enthaltenen Energie zu Nutzarbeit.
Mit ganz anderen Zahlen wartet die rechte Spalte der Tabelle auf: Bereits die Wasserturbine bringt es auf 90 %, und der einfache Tauchsieder hat einen so hohen Wirkungsgrad, daß man seine Verluste bei vielen Berechnungen einfach vernachlässigen kann.
Der Wirkungsgrad ist für die Volkswirtschaft von größter Bedeutung. Erhöht er sich für eine Maschine oder für eine ganze Produktionsanlage, sei es durch gute Pflege und Wartung der Werkzeuge und Maschinen, sei es durch technische Verbesserungen oder durch Modernisierungsmaßnahmen, so bedeutet das, daß Produkte in kürzerer Zeit, mit geringerem Energieaufwand oder weniger Ausgangsmaterial hergestellt werden können oder daß man mit gleichem Aufwand an Zeit und Energie mehr produzieren kann. Beides dient

einem der wichtigsten Leitsätze unserer Volkswirtschaft: der ständigen Steigerung der Arbeitsproduktivität.
Untersuchen wir das an unserer Winde! Nehmen wir an, ihr Wirkungsgrad betrage 60 %, und sie habe während eines Arbeitstages 150mal 250 kp 20 m hoch zu heben – eine Arbeit, die jede Bauwinde ohne weiteres bewältigen kann. Die notwendige Nutzarbeit beträgt 750 000 kpm.
Um die zuzuführende Arbeit herauszubekommen, stellen wir die Formel für den Wirkungsgrad um. Wir erhalten 1 250 000 kpm.
Erhöht man den Wirkungsgrad auf 75 %, so ergibt sich eine zuzuführende Arbeit von 1 000 000 kpm.
Es lassen sich also an dieser einen Winde täglich 250 000 kpm einsparen. Das scheint wenig, entspricht diese Arbeit doch nur etwa 0,7 kWh. In 300 Arbeitstagen aber werden bereits über 200 kWh daraus. Mit ihnen könnte man 1 t Stahl walzen oder 1500 kp Steinkohle abbauen und zur Erdoberfläche befördern. Und das ist nur *eine* Winde! Wieviel Kilowattstunden mögen noch in ungepflegten Maschinen „zerrieben" werden? Was könnte man mit ihnen alles anfangen, wenn ein wenig mehr Sorgfalt sie für unsere Industrie rettete!
Gelingt es, den Wirkungsgrad unserer sämtlichen Kraftwerke auch nur um 1 % zu erhöhen, so wird ebensoviel Elektroenergie „gewonnen" wie durch den Bau eines neuen Großkraftwerkes!
Er lohnt sich also, der Kampf um die Wirkungsgradprozente. Die These „spare mit jeder Sekunde und jedem Gramm" hat nichts Pathetisches. Sie entspringt der nüchternen Anwendung physikalischer Gesetze auf die Produktionstechnik.

$$A_n = 150 \cdot 250 \cdot 20$$
$$= 750\,000\,[\text{kpm}]$$
$$A_z = \frac{A_n}{\eta}$$
$$A_z = \frac{750\,000}{0{,}6}$$
$$= 1\,250\,000\,[\text{kpm}]$$
$$A_z = \frac{750\,000}{0{,}75}$$
$$= 1\,000\,000\,[\text{kpm}]$$

Physik an der Kuckucksuhr

„Kuckuck!" Unwillkürlich wirft Herr Peter einen Blick auf die alte Wanduhr. Bald wird sie stehenbleiben, denn ihr Gewicht hängt tief unten. Langsam zieht Herr Peter es wieder hoch: „So – jetzt läuft sie wieder ein paar Tage!"
„Einen Augenblick, Herr Peter, *warum* läuft sie jetzt wieder?"
„Na, das dürfte doch selbstverständlich sein. Ich habe die Uhr aufgezogen, ich habe Arbeit hineingesteckt; die kommt einfach wieder heraus."
Herr Peter macht ein Gesicht, als handle es sich um die natürlichste Sache von der Welt; und wirklich erscheint uns allen

dieser Vorgang so selbstverständlich, daß sicher mancher Leser über unsere Binsenweisheiten die Stirn in Falten ziehen wird. Wir „stecken", um mit Herrn Peter zu reden, „Arbeit in einen Körper", die wir sofort oder später wieder „herausholen". Das gilt nicht nur für die alte Kuckucksuhr. Wenn wir unsere Armband- oder Taschenuhr aufziehen, leisten wir Arbeit beim Spannen der Feder. Diese Arbeit bleibt „gespeichert" und tritt wieder zutage, wenn die Feder sich entspannt und dabei die Räder und Zeiger der Uhr antreibt.

Zwischen dem Zuführen und dem Wiedergewinnen der Arbeit darf eine beliebig lange Pause liegen. Herr Peter kann die Uhr nach dem Aufziehen anhalten, und wenn er sie nach vier oder sechs Wochen anstößt, läuft sie, ohne daß die am Gewicht geleistete Hubarbeit sich inzwischen verflüchtigt oder auch nur abgeschwächt hätte.

Das Uhrgewicht hatte dadurch, daß wir es hoben, ein gewisses Arbeitsvermögen erlangt; bei der aufgezogenen Taschen- oder Armbanduhr verbirgt sich diese Arbeitsfähigkeit in der gespannten Feder. Wir nennen dieses im Körper vorhandene Arbeitsvermögen „Energie"; sie ist sozusagen „auf Eis gelegte", aber jederzeit einsatzbereite Arbeit. Deshalb messen wir die Energie auch in den üblichen Arbeitseinheiten – bei der Wanduhr also in Kilopondmetern.

Das Uhrgewicht erhielt seine Energie durch das Heben, durch Verändern seiner Lage; die Uhrfeder gewinnt Energie, indem sie aus dem ungespannten in den gespannten Zustand übergeht. Energie, die ein Körper durch Lage- oder Zustandsveränderung gewann, heißt „potentielle Energie". Sie errechnet sich beim Uhrgewicht einfach aus der Arbeitsformel: Wird ein Gewicht von 2 kp um 1,5 m gehoben, so bekommt es gegenüber dem Ausgangspunkt eine Lageenergie, einen Arbeitsvorrat von 3 kpm.

Je tiefer das Uhrgewicht sinkt, um so geringer wird seine potentielle Energie. Ist es wieder unten angelangt, so hat sich sein gesamter Energievorrat in Arbeit verwandelt. Die Uhr muß von neuem aufgezogen werden oder bleibt stehen.

Nicht nur gehobene, sondern auch sich bewegende Körper können Arbeit leisten: Eine rollende Holzkugel wirft die Kegel um; eine Gewehrkugel durchschlägt eine Holzplatte; Fritzchens Fußball „durchdringt" zwei Fensterscheiben. Woher rührt nun dieses Arbeitsvermögen? In jedem Fall war Arbeit erforderlich, um die Körper in ihren Bewegungszustand zu versetzen: Der Kegler strapazierte seine Mus-

keln, Fritzchen desgleichen, und die im Lauf wirkenden Pulvergase beschleunigen das Geschoß. Auch diesmal wird die zugeführte Arbeit im Körper gespeichert. Der Körper besitzt eine gewisse „Bewegungsenergie" oder auch „kinetische Energie". Im Alltag nennen wir sie „Wucht".

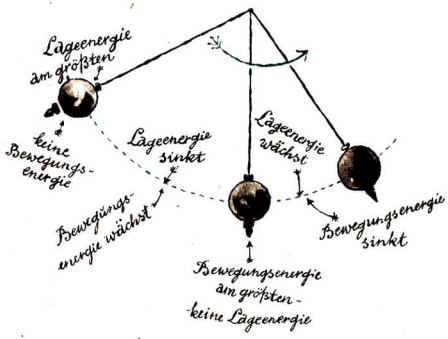
Die kinetische Energie läßt sich aus der Masse und aus der Geschwindigkeit des bewegten Körpers errechnen. Hierbei kommt der Geschwindigkeit besondere Bedeutung zu: Ein Körper, dessen Geschwindigkeit verdoppelt wird, erhält die vierfache kinetische Energie; verdreifacht man seine Geschwindigkeit, so steigt die kinetische Energie auf das Neunfache. So erklärt es sich, daß auch leichte, aber schnelle Körper beim Aufprall erhebliche Arbeit zu leisten vermögen. Eine aufschlagende Gewehrkugel beispielsweise könnte ungefähr 1000 kp 2 m hoch heben; und selbst kleine Hagelkörnchen würden uns erschlagen, bremste sie der Luftwiderstand nicht erheblich ab.

Damit erübrigt sich die Frage, was aus der potentiellen Energie wird, wenn ein gehobener Körper fällt. Sie geht nicht etwa verloren, sondern verwandelt sich in kinetische Energie. Je größer die Fallstrecke eines Körpers ist, desto geringer wird seine potentielle Energie, desto größer seine kinetische Energie. Fällt uns das Gewicht der aufgezogenen Uhr auf den Fuß, so entspricht der durch „Verformung" des Fußes hervorgerufene Schmerz der Hubarbeit, die wir vorher am Gewicht leisteten. Ein in diesem Fall allerdings schwacher Trost ... Ein Dachziegel, der aufs Pflaster fällt, gibt dabei durch seine Wucht die Arbeit wieder ab, die einmal notwendig war, um ihn auf den Bau zu befördern.

Die kinetische Energie eines fallenden Körpers kann umgekehrt auch wieder in potentielle Energie verwandelt werden. Das ist zum Beispiel bei der schon zitierten Achterbahn (s. S. 57) der Fall, wo der „Schwung" die Wagen wieder auf den nächsten Gipfel der Bahn hob und bei der Talfahrt von neuem in Wucht zurückverwandelt wurde.

Es gibt für den Wechsel zwischen Lageenergie und Bewegungsenergie ein geradezu triviales Beispiel: das Pendel oder die Schaukel. Hier findet ein fortwährender Wechsel zwischen beiden Energieformen statt. Wird der Pendelkörper aus seiner tiefsten Stellung gehoben, so erhält er eine der Hubarbeit entsprechende Lageenergie. Lassen wir den Pendelkörper los, so schwingt er nach unten. Seine potentielle Energie vermindert sich; gleichzeitig nimmt – da er ja schneller wird – seine kinetische Energie zu. Im tiefsten Punkt der

Bahn besitzt er keine durch das Heben gewonnene potentielle Energie mehr – dafür ist jetzt seine Wucht am größten. Infolge seiner Trägheit schwingt das Pendel weiter, der Pendelkörper steigt, gewinnt potentielle Energie, kehrt wieder um, wenn er (diesmal auf der anderen Seite) die Ausgangshöhe erreicht hat. Gäbe es keine Reibung an den Luftteilchen und im Lager des Pendels, so würde dieser Wechsel zwischen potentieller und kinetischer Energie ununterbrochen fortdauern. In Wirklichkeit verliert das Pendel bei jedem Durchschwingen etwas an Höhe und kommt nach einer gewissen Zeit zur Ruhe. Geeignet gebaute Pendel können allerdings nach einmaligem Anstoß tagelang schwingen.



Haben Sie es gemerkt? Auch hier bestätigt sich: Arbeit und Arbeitsvermögen gehen nicht verloren, sondern wandeln sich nur um und treten in verschiedenen Formen auf.

Der Übergang von potentieller in kinetische Energie wird auch in der Technik genutzt: Rammen und Hämmer sind Beispiele dafür, ebenso die seit vielen Jahrtausenden bekannten „Schwerkraftfallen", in denen Beutetiere durch die Wucht eines schweren Steins erschlagen werden.

Aber das sind nur „kleine Fische"! Es gibt nämlich auf der Welt einen unerschöpflichen Vorrat an Lageenergie, dessen Umwandlung in Bewegungsenergie seit Jahrhunderten von den Menschen zur Arbeitsleistung genutzt wird und der überdies den Vorteil hat, sich ständig zu erneuern und uns keinen einzigen Schweißtropfen zu kosten.

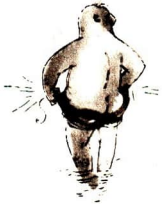
Immer, wenn wir Wasserkräfte nutzen, greifen wir auf dieses Energiereservoir zurück. Jeder Fluß, jeder Wasserfall, jeder

Bach besitzt eine gewisse kinetische Energie. Sie entstammt der potentiellen Energie des „irgendwo oben" befindlichen Wassers, sei es nun eine Quelle, ein Bergsee oder ein Staubecken.
Gehoben wurde das Wasser von der Sonne, die den Wasserkreislauf der Erde in Bewegung hält und sich dabei sogar den Luxus erlauben darf, das Wasser „unnötig hoch", nämlich bis in Wolkenhöhe zu heben.
Man hat oft keine rechte Vorstellung davon, wie groß die Lageenergie selbst verhältnismäßig geringer, hoch gelegener Wassermengen ist.
Nehmen wir einen Wasservorrat von 100 000 m^3 an, der sich 200 m über der Talsohle befinde. Es ist das eine recht bescheidene Wassermenge, die einem gefüllten Becken von 100 mal 100 mal 10 m entspricht. Fließen diese 100 000 m^3 ins Tal, so wird die gleiche Arbeit frei, die notwendig wäre, um das Wasser 200 m hoch zu heben. Es sind

$$200 \cdot 1000 \cdot 100\,000 = 20\,000\,000\,000 \text{ kpm oder} = 54\,500 \text{ kWh.}$$

Mehr als 500 Menschen müßten ein ganzes Jahr lang harte Muskelarbeit verrichten, um die gleiche mechanische Arbeit zu leisten.
In zahlreichen Stauseen aber werden Milliarden Kubikmeter Wasser gespeichert, die für uns arbeiten können. Die Wasserkräfte, die die Turbinen des Stalingrader Wasserkraftwerkes treiben, entsprechen der Muskelarbeit von etwa 140 Millionen Menschen. Schon hieraus ersehen wir, warum heute, trotz des beginnenden Atomzeitalters, die Nutzung und der weitere Ausbau der Wasserkräfte für die Volkswirtschaft so ungeheuer wichtig sind.

Auf Biegen und Brechen



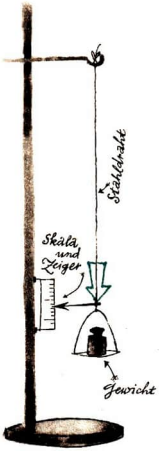
Wahrscheinlich sagen wir auf Anhieb „Gummi", wenn man uns bittet, einen elastischen Stoff zu nennen. Zu viele Dinge des täglichen Bedarfs verdanken ihr Dasein dem Saft der Hevea oder den Retorten und Kesseln der Bunaindustrie: Bälle und Weckringe, Fahrradschläuche und Autoreifen, Hosenträger und Kuponringe, die Gürtelschnur der Badehose, der Schlauch zum Gartensprengen und viele Dichtungen an Maschinen und Geräten.

Was heißt nun eigentlich „elastisch"? Ein gedehnter oder gebogener Radiergummi nimmt seine alte Form wieder an, wenn wir ihn loslassen. Die Delle in einem Ball verschwindet, wenn wir den drückenden Daumen wegnehmen. Die Sprungfedern in unserem Bett dehnen sich wieder auf ihre ursprüngliche Länge, wenn wir aufgestanden sind.

Damit ist bereits gesagt, worauf es ankommt: Elastisch nennen wir einen Körper, der nach seiner Verformung wieder seine ursprüngliche Gestalt annimmt. Ein Teigklumpen tut dies nicht – er ist unelastisch. Hier ist allerdings eine Berichtigung notwendig: Eine sozusagen bürokratische Einteilung der festen Körper in „elastisch" und „unelastisch" ist eigentlich nicht zulässig. Im Grunde sind alle Stoffe mehr oder weniger elastisch. Ein Papierblatt kehrt, wenn es nicht zu sehr verbogen wurde, in seine Ausgangsstellung zurück; die Elastizität des Holzes lieferte den Menschen im Bogen die erste Fernwaffe.

Ein zu weit gedehnter Gummizug reißt. Eine zu sehr gezogene Schraubenfeder zieht sich nicht mehr völlig in ihre Ausgangsform zusammen. „Überspannt" man den Bogen, so bricht er, oder seine Sehne wird schlaff.

Wieweit darf man einen elastischen Stoff beanspruchen, damit er seine Elastizität nicht einbüßt, damit er nicht gar zerstört wird? Was halten überhaupt Werkstoffe aus? Fragen, die für den Techniker äußerst wichtig sind! Ihre Beantwortung entscheidet über die Auswahl der Materialien und über die Abmessungen von Balken, Trägern, Stützen, Seilen, Achsen, Bolzen, Pfeilern, Fundamenten und ungezählten anderen Dingen. Alle damit zusammenhängenden Probleme werden in der „Festigkeitslehre" behandelt, einem äußerst wichtigen Teilgebiet der technischen Physik.

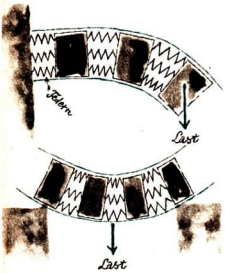


Was „erlebt" zum Beispiel ein Stahldraht, den man durch Anhängen von Gewichten mehr und mehr belastet? Das läßt sich an einem ganz einfachen Versuch verfolgen, der in Werkstofflaboratorien, Schulen und Hörsälen schon viele Tausende Male vorgeführt wurde. Unser Bild zeigt die an Bescheidenheit wohl kaum zu überbietende Experimentierausrüstung.

Sobald wir die Schale belasten, ändert der Zeiger seine Stellung gegenüber der Skala. Der Stahldraht hat sich gedehnt. Dabei bewirkt zunächst die doppelte Last die doppelte Verlängerung, dreifache Last dreifache Verlängerung. Dehnung und Belastung sind einander proportional – eine sehr wichtige Beziehung, die von dem Engländer Robert Hooke (1635 bis 1703) gefunden wurde und nach ihm „Hookesches Ge-

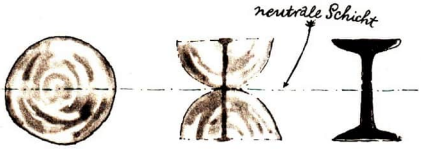
setz" heißt. Entfernen wir die Gewichte, so nimmt der Draht seine ursprüngliche Länge wieder an.
Um wieviel sich der Draht verlängert, hängt zunächst von der Belastung, seiner Ausgangslänge und seinem Querschnitt ab (ein dicker Draht läßt sich naturgemäß schwerer dehnen als ein dünner). Außerdem spielt das Material eine wesentliche Rolle. Bei einem Kupferdraht oder einem Dederonfaden erhalten wir bei dem Dehnungsversuch ganz andere Zahlenwerte als für den Stahldraht. Den Einfluß des Materials drückt man durch den „Elastizitätsmodul" aus. Er ist in Tabellen erfaßt, und wir wollen uns lediglich merken, daß ein Stoff sich gegenüber einer Dehnung um so widerstandsfähiger zeigt, je größer sein Elastizitätsmodul ist.
Doch wenden wir uns wieder dem Experiment zu! Belasten wir den Stahldraht weiter, so gelangen wir bald in einen Bereich, in dem das Hookesche Gesetz nicht mehr gilt, und wenig später zeigt sich ein ganz neuer Effekt: Von einer bestimmten Belastung ab lassen sich die Verlängerungen durch Wegnehmen der Gewichte nicht mehr rückgängig machen. Wir haben die sogenannte Elastizitätsgrenze überschritten. Sie ist für die Technik deshalb bedeutsam, weil sie angibt, was einem Werkstoff zuzumuten ist, ohne daß er sich dafür mit bleibenden Verformungen rächt.
Legen wir weiter Gewicht zu, so wächst die (nicht mehr rückgängig zu machende) Dehnung, und auf einmal ist dazu nicht einmal mehr zusätzliche Kraft erforderlich. Es ist, als habe der Draht seinen Widerstand nunmehr aufgegeben. Der Techniker sagt, das Material „fließt" (dieses Fließen können wir gut spüren, wenn wir einen einige Meter langen, dünnen Kupferdraht an einer Türklinke befestigen und ganz langsam am anderen Ende ziehen).
Noch etwas Gewicht mehr auf die Schale, und der Draht schnürt sich ein und reißt. Diese Zerreißgrenze ist fast noch wichtiger als die Elastizitätsgrenze. Sie hängt ebenfalls vom Material ab, und man charakterisiert sie durch die Angabe der Zug- oder Zerreißfestigkeit. Wird zum Beispiel für Kupfer eine Zerreißfestigkeit von 30 kp/mm² angegeben, so bedeutet das, daß ein Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt zerreißt, wenn er mit 30 kp belastet wird. Ein Draht von 3 mm² Querschnitt würde durch eine Zugkraft von 90 kp zerstört.
Was wir soeben beschrieben, gilt im Prinzip für alle Stoffe. Dabei zeigen sich allerdings von Stoff zu Stoff große Unterschiede, die aus der täglichen Erfahrung auch allgemein bekannt sind.

Materialien wie Glas, Keramik, Beton oder Mineralien sind sehr wenig elastisch und lassen sich kaum dehnen, ohne zerstört zu werden. Wir nennen solche Stoffe spröde.
Ein Stab aus ungebranntem Ton, Plastilin oder auch Kuchenteig ist zwar kaum elastisch, besitzt aber dafür einen sehr ausgedehnten Fließbereich. Solche Stoffe heißen plastisch.
Die Elastizität macht sich auch bemerkbar, wenn wir Körper einem Druck aussetzen. Der Zugfestigkeit entsprechend gibt es eine Druckfestigkeit, bei deren Überschreiten ein Körper zerquetscht wird. Sie wird ebenfalls in kp/mm² gemessen.
Bei zahlreichen Stoffen unterscheiden sich Druck- und Zugfestigkeit nur wenig voneinander, zum Beispiel bei Kupfer oder Messing. Bei Steinzeug ist es ähnlich, doch schon bei Glas oder bei Porzellan besteht zwischen Zug- und Druckfestigkeit ein Verhältnis von 1 : 10 und mehr. Auch bei Ziegeln und bei Beton übertrifft die Druckfestigkeit die Zugfestigkeit bei weitem, eine für das Bauwesen sehr wichtige Tatsache. Umgekehrt verhält sich Holz: Seine Druckfestigkeit liegt weit unter seiner Zugfestigkeit. Textilien, Seile usw. sind recht zugfest, während von Druckfestigkeit bei ihnen nicht die Rede sein kann.
Untersuchen wir nach dem Dehnen und dem Drücken das Biegen. Besonders häufig kommen dabei Probleme vor, wie sie auf nebenstehender Skizze dargestellt sind. Demonstrieren wir die beiden Fälle an einem zwischen den Fingern gebogenen Radiergummi, so können wir die Kräfteverhältnisse „sehen": Beim „einseitig gelagerten Träger" wird der Gummi an der Unterseite zusammengepreßt, an der Oberseite gedehnt, was man besonders gut erkennen kann, wenn Ober- und Unterseite beschriftet sind. Beim „zweiseitig gelagerten" Träger ist es umgekehrt. Die in die Abbildung eingezeichneten Federn sollen diese Kräfteverteilung veranschaulichen.



In der Oberhälfte des einseitig eingespannten Trägermodells werden die Federn auf Zug, in der Unterhälfte dagegen auf Druck beansprucht (beim zweiseitig gelagerten Träger ist es umgekehrt.) Der Übergang erfolgt stetig, und daraus folgt: Es muß im Träger eine (theoretisch unendlich dünne) Schicht geben, in der Druck gerade in Zug übergeht, das heißt, in der das Material des Trägers überhaupt nicht beansprucht wird. Diese Schicht existiert; man nennt sie „neutrale Schicht" oder „Nullschicht". Ihre Bedeutung ergibt sich aus folgender Überlegung: Da die Nullschicht bei Biegung nicht beansprucht wird, „hilft" das in ihr enthaltene Material auch nicht tragen. Man kann es weglassen.

Denken wir uns zum Beispiel einen Baumstamm als Träger. Gerade in der neutralen Schicht und in ihrer Nähe, wo nur geringe Belastungen auftreten, befindet sich das meiste Holz, ohne wesentlich zur Erhöhung der Tragfähigkeit beizusteuern. Sägt man den Stamm in der Mitte auseinander und setzt man die Hälften mit Bolzen so zusammen, wie im Bild unten gezeigt, so trägt diese Kombination weit mehr als der runde Stamm.

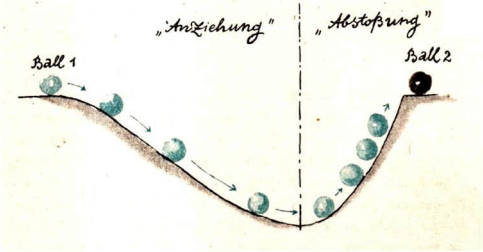


Die beiden Baumhälften haben einen Verwandten im Stahlbau: den immer wieder verwendeten I-Träger. An seinen Außenflächen, also dort, wo sich das meiste Material befindet, tritt auch die größte Belastung auf, während in der nicht beanspruchten Nullschicht nur relativ wenig Werkstoff vorhanden ist. Natürlich wäre es wenig sinnvoll, einen solchen Träger „quer" zu legen. I-Träger, deren Maße heute durch Normen festgelegt sind, halten fast soviel, als wenn sie „massiv" wären, das heißt einen rechteckigen Querschnitt besäßen. Ihr Gewicht aber beträgt, gleichen Werkstoff vorausgesetzt, weniger als $^1/_5$ vom Gewicht eines massiven Trägers.

Wenn die Kleinen zusammenhalten

Wie sich Körper verhalten, wenn wir sie ziehen, biegen, pressen oder zerreißen, wissen wir inzwischen. Wir haben uns jedoch noch keine Gedanken darüber gemacht, warum ein Körper, der doch aus einzelnen Molekülen oder Atomen aufgebaut ist, überhaupt zusammenhält.
Es sind Kräfte notwendig, bei festen Körpern sogar recht beachtliche Kräfte, um einen Körper zu zerstören. Folglich wirken, so schließen wir, auch große Kräfte zwischen den Molekülen und halten sie zusammen. Diese Molekularkräfte heißen, sofern sie zwischen den Teilchen ein und desselben Körpers auftreten, Kohäsionskräfte. Sie sind elektrischer

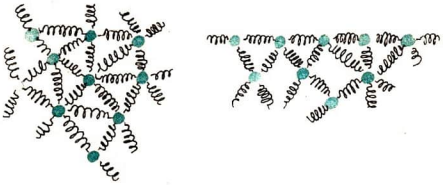
Natur und haben nichts mit der zwischen allen Körpern auftretenden Massenanziehung zu tun.
Das folgt bereits aus dem Verlauf der Molekularkräfte. Nähern sich zwei Moleküle einander bis auf Entfernungen von wenigen Millionsteln eines Zentimeters, so beginnt die Anziehungskraft wirksam zu werden. Sie wächst zunächst, nimmt dann aber wieder ab und schlägt, wenn die beiden Moleküle sich einander weiter nähern, in eine abstoßende Kraft um, die bald sehr große Werte erreicht. Als Modell können wir uns etwa vorstellen, daß ein Ball durch ein Tal auf einen anderen Ball zurollt und dabei der Schwerkraft unterliegt.



Woher man von diesem Kräfteverlauf weiß? Unter anderem daher, daß es viel schwerer ist, den Rauminhalt eines festen oder flüssigen Körpers durch Druck zu verringern als den Körper auseinander zu reißen.
Ganz anders verhalten sich gasförmige Stoffe. Ihre Moleküle sind frei beweglich und so weit voneinander entfernt, daß sich die Kohäsion nicht auswirkt. Gase breiten sich – ins Freie entlassen – immer weiter aus; andererseits bedarf es nur verhältnismäßig geringer Anstrengung, sie zusammenzupressen.
Die Flüssigkeiten nehmen eine Zwischenstellung ein. Ihre Moleküle liegen weiter auseinander als die fester Körper, die Anziehungskräfte sind infolgedessen geringer. Trotzdem zeigt auch jede Flüssigkeit einen gewissen Zusammenhalt.
Die Kohäsionskräfte in Flüssigkeiten werden zum Beispiel immer dann sichtbar, wenn sich die Oberfläche einer Flüssigkeit verhält, als sei sie mit einer dünnen, elastischen Haut überzogen. Das ist sehr häufig zu beobachten. Man kann ein Glas nicht nur randvoll, sondern „überrandvoll" schütten. Ist

man vorsichtig genug, so läßt sich ein regelrechter „Berg" aus Flüssigkeit aufgießen. Rasierklingen, Nadeln und andere leichte Metallkörper schwimmen auf dem Wasser, wenn man sie vorsichtig auf seine Oberfläche legt. Sogar ein engmaschiges Drahtgeflecht geht nicht unter. Während der warmen Jahreszeit huschen hochbeinige „Wasserläufer" über die Teiche. Sieht man genau hin, erkennt man, daß ihre Füße regelrechte Dellen in die Wasserfläche drücken, ohne einzusinken.

In Wirklichkeit gibt es natürlich keine Haut auf der Flüssigkeitsoberfläche. Die genannten Erscheinungen werden durch die sogenannte Oberflächenspannung verursacht. Die Skizze unten gibt zwei stark vergrößerte Ausschnitte aus einer Flüssigkeit wieder. Der linke wurde unter der Oberfläche, der rechte an der Oberfläche entnommen. Die zwischen den Molekülen wirkenden Anziehungskräfte haben wir als Federn dargestellt. Der Ausschnitt aus der Tiefe läßt erkennen: daß jedes Molekül nach allen Seiten etwa gleichmäßig von seinen Nachbarn angezogen wird. Es befindet sich im Gleichgewicht. Anders dagegen ergeht es den Molekülen an der Oberfläche. Bei ihnen fehlt der gleichmäßige Zug nach allen Seiten; es überwiegen die in das Innere der Flüssigkeit gerichteten Kohäsionskräfte. Die Oberfläche hat infolgedessen das Bestreben, sich zu verkleinern, oder, was dasselbe bedeutet, sie setzt jedem Versuch einer Vergrößerung Widerstand entgegen. Dieses Streben nach möglichst kleiner Oberfläche nennen wir Oberflächenspannung.



Die Oberflächenspannung demonstriert bereits jeder tropfende Wasserhahn. Ist er nicht ganz dicht, so fließt nicht etwa ein hauchdünner Strahl aus, sondern aus der Öffnung wachsen beutelförmige Tropfen, die durch die Oberflächenspannung zusammengehalten werden und erst dann abreißen, wenn diese dem Gewicht des wachsenden Tropfens nicht mehr standhält.

Recht gut können Sie die Oberflächenspannung beobachten,

wenn Ihnen einmal das Mißgeschick widerfahren sollte, ein Quecksilberthermometer zu zerschlagen. Das Quecksilber rollt in kleinen, fast kugelförmigen Tröpfchen auseinander. Die Kugelbildung ist aus dem Bestreben der Oberflächenspannung zu verstehen, die Flüssigkeitsoberfläche zu verkleinern: Von allen Körpern gleichen Rauminhalts besitzt die Kugel die kleinste Oberfläche. Schieben wir zwei Tröpfchen aneinander, so vereinigen sie sich ruckartig zu einem größeren Kügelchen – getreu dem Grundsatz, das nunmehr vergrößerte Flüssigkeitsvolumen in eine möglichst kleine Fläche einzupacken. Daß die Tropfen etwas abgeplattet sind, ist die Folge ihres Gewichts.

Auch der bekannte „Flüssigkeitsheber" zeigt die Kohäsionskräfte einer Flüssigkeit (wobei er allerdings vom Luftdruck unterstützt wird): Der „Flüssigkeitsfaden" im rechten Schenkel des Rohres zieht nach einmaligem „Ansaugen" die Flüssigkeit im linken, kürzeren Schenkel nach, solange das rechte Rohrende tiefer liegt als der Flüssigkeitsspiegel und solange der Flüssigkeitsfaden nicht durch Luftblasen eingeschnürt wird und abreißt. Daß hier tatsächlich Kohäsionskräfte die Hauptrolle spielen und nicht der Luftdruck, erweist die Tatsache, daß ein solcher Heber auch im stark luftverdünnten Raum funktioniert.

Auch zwischen den Molekülen verschiedener Körper treten Anziehungskräfte auf. Man nennt sie Adhäsionskräfte. Sie sind allerdings nur zu bemerken, wenn sich die Moleküle der beiden Körper nahe genug kommen. Zwei auf Hochglanz polierte Stahlplatten zum Beispiel haften infolge der Adhäsion so fest aufeinander, daß es nur mit Mühe gelingt, sie zu trennen. Zwei Platten mit rauher Oberfläche dagegen zeigen keine Adhäsionswirkung.

Die Adhäsion ist an vielen Erscheinungen und Vorgängen des täglichen Lebens beteiligt. Kreide haftet an der Tafel, weil die winzigen, beim Schreiben abgeriebenen Kreideteilchen durch Adhäsionskräfte an der Tafel festgehalten werden. Gleiches geschieht bei jedem Bleistift- oder Füllhalterstrich. Drucken und Malen sind ebenfalls Anwendungen der Adhäsionskraft. Wie sehr wir uns auf diese verlassen, geht daraus hervor, daß wir sie bewußt anwenden, um verschiedene Körper miteinander zu verbinden. Kleben wir einen Briefumschlag zu, so ist es die Adhäsion zwischen Klebstoff und Papier, die das möglich macht; leimt der Tischler zwei Holzplatten zusammen, so sind die Adhäsionskräfte zwischen Leim und Holz das, was zusammenhält.

In jüngster Zeit wurden von unserer chemischen Industrie Klebstoffe mit ganz außerordentlicher Klebkraft entwickelt. Ihre Ausgangsstoffe sind Azetylen und Teer. Diese Stoffe erfüllen den alten Wunsch der Techniker, auch Metalle kleben zu können. Man kann mit ihnen Schellen für Rohrleitungen am Mauerwerk befestigen, kann Fensterrahmen aus Leichtmetall in die Mauern „leimen" und sogar Stahlbrücken zusammenkleben. Die „Metallklebetechnik" wird es ermöglichen, ganz neue, zeit- und materialsparende Arbeitsverfahren im Maschinenbau und im Verkehrswesen einzuführen.

Treffen feste und flüssige Körper zusammen, so kommt es zu einem deutlichen Wechselspiel zwischen Kohäsion und Adhäsion. Quecksilbertropfen bleiben auf Grund ihrer großen Kohäsion annähernd kugelförmig und haften nicht an Papier. Wassertropfen dagegen nehmen Linsenform an und benetzen das Papier. Die Kohäsionskräfte des Wassers sind geringer, die Adhäsion am Papier kann sich stärker auswirken. Eingefettetes Papier wiederum zeigt gegenüber Wasser kaum Adhäsionswirkungen, die Tropfen laufen ab, ohne das Papier zu benetzen. Die Frage, ob eine Flüssigkeit an einer Fläche haftet oder nicht, ob eine Fläche oder ein Körper benetzt wird oder trocken bleibt, ist durchaus nicht nebensächlich. Tinte haftet nicht auf fettigem Papier oder auf einer Glasscheibe; deshalb greift der Glaser zu einem Spezialstift, wenn er Glas markieren muß.

Auf den Metallflächen von Maschinen soll Wasser möglichst wenig haften. Deshalb (und auch aus anderen Gründen) überzieht man lagernde Maschinenteile mit einer schwer benetzbaren Fett- oder Schutzlackschicht.

Isolatoren von Hochspannungsleitungen werden in jüngster Zeit häufig mit wasserabweisenden Silikonharzen überzogen, um Spannungsüberschlägen bei Regen und Nebel vorzubeugen.

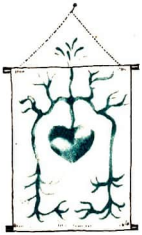
Umgekehrt ist es beim Waschen – ganz gleich, ob es sich um Teller oder um Wäschestücke handelt. Sie sollen benetzt werden, damit der Schmutz abgelöst oder aus ihren Poren gespült wird. Die Wirkung der Waschmittel beruht deshalb auch darauf, daß sie die Oberflächenspannung und die Kohäsion des Wassers vermindern und die Adhäsionskräfte stärker hervortreten lassen. Ein Waschmittel ist stets gleichzeitig „Netzmittel". Übrigens läßt sich das durch eine kleine Abänderung eines oben erwähnten Versuchs leicht zeigen: Die auf klarem Wasser schwimmende Rasierklinge geht unter, wenn wir etwas Seifenlösung zugießen.

Ob zwischen einem festen Körper und einer Flüssigkeit die Adhäsions- oder die Kohäsionskräfte überwiegen, läßt sich jederzeit am Flüssigkeitsrand eines nicht ganz gefüllten Glases beobachten. Sind die Adhäsionswirkungen stärker, so wird die Flüssigkeit am Rand etwas angehoben; es geht am Rande „bergauf". Überwiegt die Kohäsion, so senkt sich der Flüssigkeitsrand; es geht am Rande „bergab". Dieses Hochziehen oder Herabdrücken macht sich besonders in engen Röhren bemerkbar. Benetzt die Flüssigkeit die Rohrwand, so wird durch das Wechselspiel zwischen Adhäsion und Kohäsion die Flüssigkeit emporgezogen, und zwar so weit, bis Gleichgewicht zwischen den hochziehenden Kräften und dem Gewicht der gehobenen Flüssigkeitssäule besteht. Da diese Erscheinung mit abnehmendem Rohrdurchmesser deutlicher wird, nennt man sie bezeichnenderweise „Haarröhrchenwirkung" oder „Kapillarität".

Wird die Rohrwand nicht benetzt (Glasrohr in Quecksilber), so wird die Flüssigkeitssäule im Rohr ein Stück nach unten gedrückt.

Auch die Kapillarwirkungen begleiten uns auf Schritt und Tritt. Daß Petroleum im Docht einer Lampe und Paraffin im Docht der Kerze emporsteigen, sind Folgen der Kapillarität. Löschpapier saugt Tintenflecke auf Grund der Kapillarwirkung seiner ungezählten Poren auf. Übrigens geht das Haften von Tinte auf Schreibpapier nicht ausschließlich auf die Adhäsion, sondern teilweise auch auf die Kapillarwirkung zurück, da die Tinte etwas in die Oberfläche eindringt. Bei nicht tintenfestem Papier sind die ungezählten feinen Röhrchen nicht durch Leim verstopft, die Tinte läuft auseinander.

Am bekannten Ausbügeln von Fettflecken mit Löschpapier sind Kohäsions-, Adhäsions- und Kapillarwirkungen beteiligt: Die Kohäsion des Fettes und seine Adhäsion am Gewebe werden durch das Erhitzen vermindert, das Fett wird in die Haarröhrchen des darüberliegenden Löschpapiers gesaugt.



Das Aufquellen von Holz und Hülsenfrüchten durch eindringende Feuchtigkeit wird letzten Endes ebenfalls durch die Kapillarität verursacht. Auch das Blut gelangt durch Kapillarwirkung bis in die feinsten Blutgefäße.

Vom flüssigen Hebel zur Wasserleitung

Gewiß konnten Sie noch niemals beobachten, daß der Spiegel einer ruhenden Flüssigkeit schräg steht. Fast ebenso gewiß ist aber auch, daß kaum jemand darüber nachdenkt, warum ruhende Flüssigkeitsoberflächen (von ihren Rändern abgesehen) stets waagerecht bleiben, ohne Rücksicht darauf, wie wir das zugehörige Gefäß halten. Der Grund ist der gleiche, aus dem es uns nicht gelingt, aus Murmeln einen Berg aufzuschütten. Alle Murmeln unterliegen der Schwerkraft. Da sie trotz der Reibung verhältnismäßig frei beweglich sind, suchen sie dem Erdmittelpunkt möglichst nahe zu kommen; der Berg läuft auseinander.

Flüssigkeitsteilchen sind noch leichter gegeneinander verschiebbar. Würden wir auf einer Flüssigkeit eine Erhöhung aufzuschütten versuchen, so glitten sämtliche dazu verwendeten Tröpfchen unverzüglich auseinander. Bei einer schrägen Oberfläche rutschten die höhergelegenen Teilchen so lange bergab, bis sich der Ausgleich vollzogen hätte. Der „künstliche Horizont" mancher Navigationsgeräte ist ebenfalls nichts anderes als eine Flüssigkeitsoberfläche, die sich selbsttätig immer wieder waagerecht einstellt.

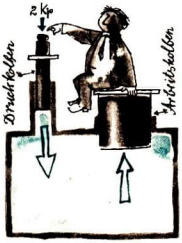
In Hörsälen wird mitunter ein höchst überraschender Versuch vorgeführt: Eine offene Holzkiste wird mit Wasser gefüllt und aufgehängt. Schießt man von der Seite eine Pistolenkugel in die Kiste, so wird diese in kleine Holzsplitter zerfetzt.

Die Ursache dafür ist den Physikern seit langem bekannt: Flüssigkeiten lassen sich auch durch große Kräfte kaum zusammendrücken; sie sind so wenig „kompressibel", daß wir sie meistens als nicht zusammendrückbar, als „inkompressibel" betrachten dürfen. Im Versuch verdrängt die mit großer Geschwindigkeit eindringende Kugel Flüssigkeit. Das Wasser in der Kiste läßt sich aber weder komprimieren, noch weicht es (Trägheit!) schnell genug aus. Es entstehen sehr große Druckkräfte, die die Kiste zersprengen. Die oft vernichtende Wirkung von Blasen- oder Magenschüssen geht auf die gleiche Ursache zurück.

Der Versuch weist auf eine andere Eigenschaft jeder Flüssigkeit hin: Druck pflanzt sich in ihr nach allen Seiten fort. Schließen wir eine alte Fußballblase, die wir an vielen Stellen mit einer Nadel durchstochen haben, an die Wasserleitung an, so spritzt das Wasser nach allen Seiten gleichmäßig aus der Blase. Würden wir jede Öffnung mit einem Druckmesser,

einem Manometer, verschließen, so zeigte jedes Instrument den Druck an, der in der Wasserleitung herrscht.

Die gleichmäßige Druckfortpflanzung ist die Grundlage der „hydraulischen Kraftübertragung". Ihre Arbeitsweise geht aus der Abbildung hervor. In zwei zylindrischen Ansätzen eines Flüssigkeitsbehälters sitzen beweglich, aber dicht zwei Kolben. Der Querschnitt des linken Kolbens betrage 1 cm^2, der des rechten 50 cm^2. Setzen wir uns auf die am rechten Kolben angebrachte Platte und legen wir gleichzeitig ein 2-kp-Gewicht auf die Platte des linken Kolbens, so werden wir hochgehoben.

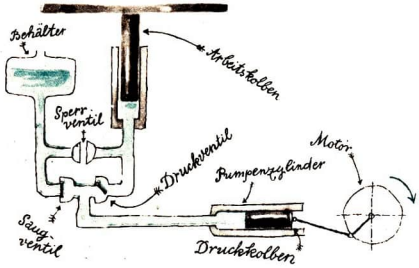


Die Erklärung ist nicht schwer: An der Unterseite des linken Kolbens tritt ein Druck von 2 kp/cm^2 auf. Er pflanzt sich durch die Flüssigkeit fort; jede Stelle der Wand ist ihm ausgesetzt, und auch die Unterseite des rechten Kolbens hat ihn aufzufangen. Da aber auf einen Quadratzentimeter der Kolbenfläche 2 kp drücken, wirken auf die Gesamtfläche von 50 cm^2 100 kp, und diese Kraft reicht aus, um unser Gewicht zu überwinden und uns zu heben, es sei denn, wir wögen mehr als 100 kp.

Durch Vermittlung einer Flüssigkeit lassen sich demnach kleine Kräfte in große Kräfte verwandeln. Die gezeigte Vorrichtung ist gewissermaßen ein „flüssiger Hebel". An die Stelle der Hebelarme treten die Kolben; ihr Flächenverhältnis bestimmt die Kraftübersetzung: Ist zum Beispiel der Querschnitt des „Druckkolbens" 1000mal kleiner als der Querschnitt des „Arbeitskolbens", so tritt jede am Druckkolben wirksame Kraft tausendfach verstärkt am Arbeitskolben auf. Auch hier gilt, wie schon so oft, die goldene Regel der Mechanik: Während der Druckkolben sich um ein erhebliches Stück senkt, steigt der Arbeitskolben nur wenig. Das kommt daher, daß die vom Druckkolben verdrängte Wassermenge sich beim Heben des Arbeitskolbens auf einen viel größeren Querschnitt verteilt.

Sehr bekannt ist die „hydraulische Presse", bei der anstatt Wasser meist Öl oder eine andere Flüssigkeit verwendet wird. Sie wird angewandt, wo auf einfache, leicht steuerbare Weise große und größte Kräfte ausgeübt werden sollen. Das gilt für Pressen in Stahlwerken, bei der Verformung von Blechen und Plastikmaterial und bei vielen anderen Verfahren der spanlosen Verformung.

Die Hebebühne auf S. 105 läßt die Arbeitsweise einer hydraulischen Presse gut erkennen: Durch jede Bewegung des Druckkolbens wird Flüssigkeit unter den Arbeitskolben gepreßt



und hebt ihn ein Stückchen höher. Die Ventile verhindern, daß der belastete Arbeitskolben wieder zurücksinkt, und stellen die Verbindung mit dem Flüssigkeits-Vorratsbehälter her. Kippvorrichtungen zum selbsttätigen Entladen von Lastkraftwagen oder von Waggons sind ähnlich konstruiert.

Druck- und Arbeitskolben einer hydraulischen Kraftübertragung brauchen nicht dicht beieinander zu liegen. Das ist ein weiterer Vorteil, denn oft ist es erforderlich, Kräfte nicht nur zu übersetzen, sondern obendrein über größere Entfernungen fortzuleiten. Mechanische Verbindungen wie Gestänge oder Seilzüge sind dafür wenig geeignet, da sie kompliziert und mit erheblichen Verlusten (Reibung!) behaftet sind; elektrische Übertragungen sind nicht immer möglich.

Die Flüssigkeitsbremse des Kraftwagens ist eine solche hydraulische Kraftübertragung: Beim Treten des Bremspedals wird ein Kolben in den Hauptbremszylinder gedrückt. Durch Rohrleitungen überträgt die Bremsflüssigkeit diesen Druck auf Arbeitskolben in den Bremszylindern an den Rädern; die Bremsbacken werden gespreizt und hemmen die Raddrehung.

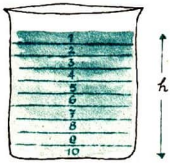
Die Steuerflächen großer und schneller Flugzeuge ließen sich „von Hand" während des Fluges wegen der großen, durch die vorbeiströmende Luft verursachten Gegenkräfte nicht bewegen. Eine „Hydraulik" setzt den Kraftaufwand herab und überträgt die zum Steuern notwendigen Kräfte. Das Fahrgestell wird ebenfalls hydraulisch ausgefahren und eingezogen.

In der Steuer- und Regeltechnik gewinnen hydraulische Kraftübertragungen gleichfalls ständig an Bedeutung. Mit ihrer Hilfe wird es möglich, auch größte Anlagen „mit dem kleinen Finger" zu bedienen. Sie bewegen und halten Werk-

stücke und Werkzeuge und sind – zusammen mit elektronischen Geräten – wichtige Bausteine bei der fortschreitenden Automatisierung der Betriebe.

Die Kräfte, denen wir Flüssigkeiten bisher aussetzten, kamen von außen. Man nennt den durch sie in der Flüssigkeit verursachten Druck Stempel- oder auch Kolbendruck. Er ist, dies sei nochmals gesagt, an allen Stellen der Flüssigkeit gleich.

Das gilt für eine andere Art von Druck in Flüssigkeiten, den „Schweredruck", nicht. Man darf nämlich nicht immer – wie wir es bisher taten – das Eigengewicht einer Flüssigkeitsmenge unbeachtet lassen. Denken wir uns einmal eine Flüssigkeit in einzelne, dünne Scheiben zerlegt, so lastet auf Scheibe 2 das Gewicht von Scheibe 1, auf Scheibe 3 das Gewicht der Scheiben 1 + 2, auf Scheibe 4 das Gewicht der Scheiben 1 + 2 + 3. Diese Gewichte rufen in der Flüssigkeit einen bestimmten, mit der Tiefe zunehmenden Druck hervor; und ihn nennt man den Schweredruck. Seine Bestimmung bereitet keine Schwierigkeiten: Das Gewicht der über dem Gefäßboden liegenden Flüssigkeit errechnet sich nach der Beziehung:



$$G = F \cdot h \cdot \gamma$$

$$p = \frac{F \cdot h \cdot \gamma}{F}$$

$$p = h \cdot \gamma$$

Gewicht = Rauminhalt · Wichte
= Bodenfläche · Flüssigkeitshöhe · Wichte

Um daraus den Druck zu erhalten, müssen wir (vgl. S. 29) durch die Fläche teilen.

Der Schweredruck im Zylinder wird also ausschließlich von der Wichte der Flüssigkeit und von der Höhe der Flüssigkeitssäule bestimmt, nicht aber von Größe oder Form ihrer Fläche. Setzen wir h in cm und γ in p/cm³ ein, so erhalten wir den Druck in p/cm². Diese Berechnung ist nicht auf den Druck am Boden beschränkt; wir können sie ebensogut durchführen, wenn eine in der Tiefe h unter der Oberfläche liegende Wasserschicht betrachtet wird.

Wasser besitzt die Wichte 1 p/cm³. Auf dem Boden eines 10 m tiefen Teiches herrscht demnach ein Druck von 1000 p/cm², das heißt von 1 at; dazu ist noch der Luftdruck zu addieren.

Unsere Formel gilt nicht nur für einen Zylinder, sondern für beliebig gestaltete Gefäße. Wir können ganz allgemein feststellen: Der Schweredruck in einer Flüssigkeit hängt nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule und von der Wichte der Flüssigkeit ab. Der Kolben, das Becherglas und das konische Ge-

fäß sind, was den Schweredruck anbelangt, gleichwertig. Daß in allen Behältern von gleicher Flüssigkeitshöhe der Schweredruck am Boden gleich groß ist, erscheint auf den ersten Blick so merkwürdig, daß man diese Erscheinung „hydrostatisches Paradoxon" nennt.

In einer Flüssigkeit pflanzt sich Druck nach allen Seiten gleichmäßig fort; also darf der Schweredruck nicht nur nach unten wirken, sondern muß in jeder Richtung feststellbar sein. Es gibt daher nicht nur einen „Bodendruck", sondern auch einen „Seitendruck" auf die Gefäßwände. Er ist ebensogroß wie der Schweredruck in gleicher Tiefe.

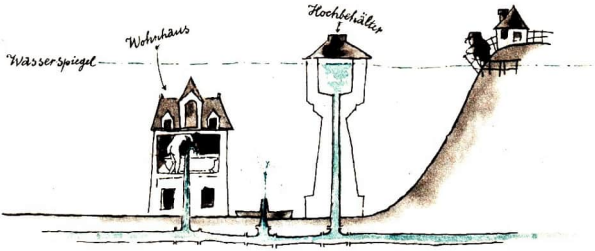
Aus einem Loch, das 5 m unter der Flüssigkeitsoberfläche eines Wassertanks liegt, spritzt das Wasser mit einem Druck von 0,5 at aus; bei 100 m Abstand von der Oberfläche betrüge der Druck 10 at.

Ein Taucher in 50 m Tiefe ist auf allen Seiten einem Druck von rund 5 at ausgesetzt, und auf der Oberfläche einer Kugel für Tiefseeforschungen lastet in 1000 m Tiefe ein Druck von mehr als 100 at (die Wichte von Seewasser ist größer als die von Süßwasser).

Der Schweredruck ist es auch, der uns dazu zwingt, die Mauern von Staudämmen und Talsperren nach unten immer stärker werden zu lassen.

Öffnen wir den Hahn zwischen zwei verbundenen Gefäßen, so fließt so lange Flüssigkeit durch das Verbindungsrohr, bis die Flüssigkeit in beiden Gefäßen gleich hoch steht. Diese bekannte Erscheinung erklärt sich gleichfalls aus dem Schweredruck. Am linken Rohrende herrscht wegen der höheren Flüssigkeitssäule ein größerer Druck als in der rechten Rohrmündung. Infolgedessen drückt die Flüssigkeit im linken Gefäß nach rechts, und zwar so lange, bis Druckausgleich erfolgt ist. Das aber ist (gleiche Flüssigkeiten in beiden Gefäßen vorausgesetzt) der Fall, wenn beide Flüssigkeitsspiegel gleich hoch stehen.

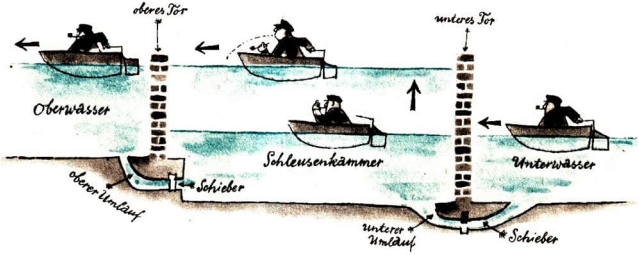
Es gilt die Regel: In verbundenen Gefäßen stehen die Flüssigkeitsspiegel stets gleich hoch. Die vielleicht wichtigste Anwendung findet diese Beziehung bei Wasserleitungen. Steht,



wie unser Bild zeigt, ein Wasserbehälter an erhöhter Stelle, so versucht das Wasser überall im Leitungsnetz die gleiche Höhe zu erreichen. Drehen wir einen tiefer als der Wasserspiegel gelegenen Wasserhahn auf, so strömt Wasser aus. Im Höchstfall kann das Wasser in Höhen bis zum Flüssigkeitsspiegel im Wasserturm ausströmen; das auf dem rechten Berg liegende Haus könnte also nicht von der zentralen Wasserleitung versorgt werden. Deshalb errichtet man Wassertürme oder „Hochbehälter" immer an möglichst hoch gelegenen Standorten.

Daß der Grundwasserspiegel sich über größere Flächen einigermaßen ausgleicht und daß in Brunnen Wasser zusammenläuft, ist gleichfalls eine Folge der – hier durch die Poren im Erdreich vertretenen – verbundenen Gefäße.

Bei Schleusen wird dieses Prinzip ebenfalls angewandt. Bei der Bergfahrt eines Schiffes ist das Schleusenbecken zunächst auf Höhe des Unterwassers gefüllt; das Schiff kann einfahren. Dann wird das talwärts weisende Schleusentor geschlossen und ein Schieber geöffnet, der eine Verbindung zum Oberwasser herstellt. Der Wasserspiegel in der Schleuse und mit ihm das Schiff steigen bis auf das Niveau des Oberwassers. Nachdem die bergwärts weisenden Schleusentore geöffnet worden sind, kann das Schiff seine Fahrt fortsetzen.



Noch einmal Archimedes

Wir haben von den Kopfschmerzen gelesen, die sich Archimedes um einen Goldschmuck seines Königs machen mußte. Der Name des Herrschers sagt uns nichts mehr; die Beziehungen aber, die der Weise von Syrakus für das Schwimmen und Tauchen von Körpern aufdeckte, lernt heute jeder Schüler als „Archimedisches Prinzip" kennen.

Drücken wir einen schwimmenden Körper unter den Flüssigkeitsspiegel, so spüren wir einen deutlichen Widerstand. Die Flüssigkeit übt eine nach oben gerichtete Kraft auf den Körper aus. Diese Kraft ist auch an nicht schwimmfähigen Körpern festzustellen: Ein Stein erscheint uns unter Wasser leichter als in Luft.

Wo rührt diese Kraft her? Wie wirkt sie sich aus? Untersuchen wir das an einem in einer Flüssigkeit hängenden, nicht schwimmfähigen Zylinder. Auf seine obere Stirnfläche F wirkt der Schweredruck p_o. Daraus ergibt (vgl. S. 29) sich die auf die obere Stirnfläche F wirkende Kraft zu P_o. Diese Kraft versucht, den Zylinder auf den Boden des Gefäßes zu drücken. Die untere Stirnfläche ist dem Schweredruck p_u und damit der Kraft P_u ausgesetzt. Diese Kraft wirkt nach oben; sie versucht, den Zylinder zu heben. Um die resultierende Kraft zu erhalten, müssen wir die Differenz bilden, die wir mit A bezeichnen. Dann ergibt sich die gesuchte Formel.

$$p_o = a \cdot \gamma$$
$$P_o = F \cdot p_o = F \cdot a \cdot \gamma$$
$$p_u = (a+h) \cdot \gamma$$
$$P_u = F \cdot (a+h) \cdot \gamma$$
$$P_u - P_o = F \cdot (a+h-a) \cdot \gamma$$
$$\boxed{A = F \cdot h \cdot \gamma}$$

P_u ist wegen des mit zunehmender Tiefe wachsenden Schweredrucks größer als P_o. Daher wirkt die resultierende Kraft A nach oben: Man nennt sie „Auftrieb", denn um sie wird ein Körper in der Flüssigkeit scheinbar leichter.

Und nun sehen Sie sich noch einmal die letzte Formel an! Was in ihr rechts vom Gleichheitszeichen steht, ist nichts anderes als das Gewicht einer Flüssigkeitssäule mit den Abmessungen des getauchten Zylinders. Es gilt die wichtige Regel:

Der Auftrieb eines untergetauchten Körpers ist gleich dem Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Das ist das berühmte „Archimedische Prinzip". Unsere der Einfachheit halber an einem Zylinder vorgenommene Herleitung läßt sich leicht auf alle Körper ausdehnen, ganz gleich, welche Form sie aufweisen.

Natürlich verursacht der Schweredruck auch Kräfte auf die Seitenwand des Zylinders (und jedes anderen Körpers).

Doch diese Kräfte heben sich auf, da sie von vorn und hinten, von rechts und links, kurz, von allen Seiten auf den Zylinder einwirken. Wäre das nicht der Fall, so würde ein getauchter oder ein schwimmender Gegenstand sich von selbst nach der Seite der geringeren Druckkräfte bewegen.

Halten wir es nochmals fest: Zwei Kräften ist jeder Körper in einer Flüssigkeit ausgesetzt: Seinem Gewicht und einer nach oben drückenden Kraft. Beide Kräfte zusammen ergeben eine scheinbare Gewichtsverminderung, den Auftrieb.

Drei Fälle sind denkbar: Ist ein ganz in Flüssigkeit eingetauchter Körper schwerer als die von ihm verdrängte Flüssigkeit, so überwindet das Gewicht den Auftrieb: der Körper sinkt auf den Grund.

Ist er ebenso schwer wie die von ihm verdrängte Flüssigkeit, so halten sich Gewicht und Auftrieb die Waage: Der Körper schwebt in der Flüssigkeit.

Besonders wichtig ist die dritte Möglichkeit: Ist ein ganz in Flüssigkeit eingetauchter Körper leichter als die von ihm verdrängte Flüssigkeit, so überwindet der Auftrieb das Gewicht. Der Körper steigt hoch und schwimmt.

Dabei entsteht sofort die Frage: Wie weit steigt der Körper nach oben oder, anders ausgedrückt, wie tief sinkt ein schwimmender Körper ein?

Sobald der Körper aus der Flüssigkeit aufzutauchen beginnt, wird die verdrängte Flüssigkeitsmenge geringer; der Auftrieb vermindert sich. Der Körper steigt weiter, und der Auftrieb nimmt weiter ab – so lange, bis er ebenso groß ist wie das (selbstverständlich unverändert gebliebene) Gewicht des Körpers. Ist dieser Gleichgewichtszustand erreicht, so kann der Auftrieb den Körper nicht mehr höher drücken. Er kommt nach einigem Auf- und Abpendeln zur Ruhe.

Erinnern wir uns, daß der Auftrieb nichts anderes ist als das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge, so können wir eine wichtige Schlußfolgerung ziehen:

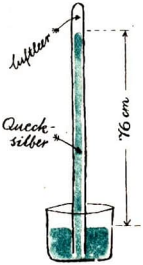
Jeder schwimmende Körper verdrängt die seinem Gewicht entsprechende Flüssigkeitsmenge. Ein 500 kp schwerer Holzstamm taucht so tief in Wasser ein, daß er 500 kp Wasser verdrängt. Eine 1 kp schwere Hohlkugel aus Blech verdrängt 1 l Wasser. Ein randvoller Becher wird nicht schwerer, wenn wir eine Holzkugel hineinwerfen; denn eine genau ihrem Gewicht entsprechende Flüssigkeitsmenge läuft über. Im Großen nutzt man das bei Schiffshebewerken aus. Ihr Trog, in dem Flußschiffe wie in einem Fahrstuhl gehoben und gesenkt werden, behält stets sein Gewicht – unabhängig davon,

ob er leere oder beladene, ob er ein oder zwei Lastkähne aufnimmt; denn die Schiffe verdrängen auch diesmal eine Wassermenge aus dem gefüllten Trog, die dem Schiffsgewicht entspricht. Für die Konstruktion eines Schiffshebewerkes ist das sehr vorteilhaft. Man gleicht das Troggewicht durch Gegengewichte aus, die an dicken Stahlseilen hängen, und kommt beim Heben und Senken mit verhältnismäßig geringen Antriebskräften aus.
Je größer die Wichte einer Flüssigkeit ist, desto weniger tief taucht ein schwimmender Körper ein; denn größere Wichte bedeutet vermehrten Auftrieb. Der Tiefgang eines Schiffes ist daher in Salzwasser geringer als in Süßwasser; und in einem salzigen Binnenmeer trägt das Wasser einen Schwimmer besser als in einem Süßwassersee.

Wetterbericht, Tomatensaft und Fahrradpumpe

„. . . der Luftdruck, bezogen auf Meereshöhe, 760 Torr gleich 1013 Millibar . . ." Täglich mehrmals hören wir es so oder ähnlich im Rundfunk, und ebensooft klopfen wir, besonders vor unserem Urlaub, erwartungsvoll an das Barometer, um zu sehen, ob es „steigt" oder „fällt". Was da steigt oder fällt, ist allerdings der Luftdruck – eben der, von dem auch der Wetterbericht spricht.
Was ist Luftdruck? Wie entsteht er? Was heißt „auf Meeresspiegel bezogen"? Was sind Torr, Millibar oder die auf Barometerskalen verzeichneten „Millimeter"?
Wir müssen, um diese Fragen zu beantworten, wie es so schön heißt, „etwas weiter ausholen". Die Erde besitzt eine Atmosphäre. Sie reicht bis in Höhen von einigen hundert Kilometern und besteht aus dem Gasgemisch Luft, das vor allem Stickstoff enthält und dessen für uns wichtigster Bestandteil Sauerstoff ist.
Die Moleküle der Luft sind wie die jedes anderen Gases frei beweglich und relativ weit voneinander entfernt. Das ändert jedoch nichts daran, daß sie von der Erde angezogen werden. Infolgedessen hat auch die Luft Gewicht. Zwar ist ihre Wichte in Meereshöhe bei 0 °C rund 800mal geringer als die des Wassers, doch wiegt ein Kubikmeter Luft dort immerhin etwa 1,3 kp. Um die Luft eines Zimmers auf einmal wegzutragen, müßten wir uns ganz schön anstrengen – sie wiegt mehr als 50 kp.

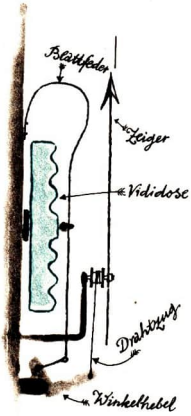
Der Luftdruck ist daher der Schweredruck der auf der Erde lastenden Luftmasse und pflanzt sich, ähnlich wie der Flüssigkeitsdruck, gleichmäßig nach allen Seiten fort.
Damit findet auch die mehrfach genannte Einschränkung „auf Meereshöhe" ihre Begründung. Je weiter wir vom Grunde des Luftozeans, auf dem wir leben, nach oben steigen, desto geringer wird der Luftdruck. Infolgedessen hängt der Luftdruck von der Höhenlage eines Ortes ab. Will man, was für die Wetterkunde von ausschlaggebender Bedeutung ist, den Luftdruck vieler Beobachtungsstellen miteinander vergleichen, so muß man die durch verschiedene Höhe der Beobachtungsorte bedingten Unterschiede ausschalten. Man rechnet deshalb den an einem bestimmten Ort gemessenen Luftdruck auf einen gedachten Ort in Höhe des Meeresspiegels um.
Der Luftdruck nimmt mit der Höhe nach einem verwickelteren Gesetz ab als der Schweredruck im Wasser. Schuld daran ist die bereits erwähnte (vgl. S. 98) Kompressibilität der Gase. Die Luft ist in Bodennähe am dichtesten, denn hier wird sie durch die darüberliegende Luft am meisten zusammengepreßt. Bei zunehmender Höhe läßt dieses Pressen nach, die Luft wird immer dünner, ohne daß sich eine scharfe Obergrenze der Lufthülle angeben ließe.
Wie groß ist der Luftdruck? Wie kann man ihn überhaupt messen? Die älteste, sozusagen klassische Methode stammt von Evangelista Torricelli (1608 bis 1647), einem Schüler Galileis. Er füllte eine an einem Ende geschlossene lange Glasröhre mit Quecksilber und stellte sie, ohne das Quecksilber auslaufen zu lassen, mit der Öffnung nach unten in eine ebenfalls Quecksilber enthaltende Schüssel. Wurde die Öffnung der Röhre freigegeben, so begann der Quecksilberspiegel in ihr zu sinken. Dabei zeigte es sich jedoch, daß die Röhre sich nicht völlig entleerte; das Quecksilber stand, vom Flüssigkeitsspiegel aus gemessen und in heutigen Einheiten ausgedrückt, etwa 76 cm hoch.



Wie ist das zu erklären? Durch sein Gewicht trachtet das Quecksilber nach unten zu sinken und aus der Röhre zu fließen, wobei oberhalb des Quecksilbers ein Raum entsteht, der keine Luft, sondern nur noch etwas Quecksilberdampf enthält. Auf den Quecksilberspiegel im Gefäß wirkt der äußere Luftdruck. Das Quecksilber sinkt nur so lange, bis der Druck der Quecksilbersäule und der äußere Luftdruck einander die Waage halten. Das ist der Fall, wenn die Höhe der Quecksilbersäule – vom Flüssigkeitsspiegel aus gerechnet – etwa 760 mm ausmacht. Man hat daher als normalen Luftdruck

den Druck festgesetzt, der einer Quecksilbersäule von 760 mm das Gleichgewicht hält. So kommen die Luftdruckangaben in Millimeter zustande, wobei es eigentlich stets „Millimeter Quecksilbersäule" heißen müßte.

Für 1 mm Quecksilbersäule verwenden wir jetzt allgemein die Einheit „Torr", zur Erinnerung an Torricelli. Die gleichfalls verwendete Druckeinheit „Millibar" (mb) wird aus anderen physikalischen Einheiten hergeleitet. 1 mb entspricht 0,750 Torr.



Der Luftdruck wird, wie allgemein bekannt, mit dem Barometer gemessen. Dabei benutzt man für sehr genaue Messungen immer noch die schon von Torricelli angegebene Anordnung, natürlich in verbesserter, dem jeweiligen Zweck gut angepaßter Form. Die Barometer in unseren Wohnungen verwenden meistens die „Vididose". Dies ist eine (nach ihrem Erfinder benannte) luftleer gepumpte Blechschachtel mit gewelltem Deckel. In Abhängigkeit vom herrschenden Luftdruck wölbt sich der Deckel mehr oder weniger ein. Über einen Stift, einen Winkelhebel und eine Rolle wird ein Zeiger gedreht, der vor einer in Torr und Millibar geeichten Skala spielt. Mit Hilfe einer Stellschraube kann das Anzeigesystem so justiert werden, daß der Zeiger unmittelbar den auf Meeresspiegel bezogenen Luftdruck angibt.

Versieht man den Zeiger mit einem Schreibröhrchen und läßt man ihn über einen langsam bewegten Papierstreifen gleiten, so wird der Luftdruckverlauf selbsttätig registriert; das Barometer wird zum Barographen.

Der Luftdruck nimmt in Bodennähe um rund 1 Torr je 10 m Höhendifferenz ab. Man kann daher ein Barometer als „Höhenmesser" eichen. Während vieler Jahre war der barometrische Höhenmesser unentbehrliches Instrument jedes Flugzeugs. Er hatte gewisse Nachteile: Er maß nicht die tatsächliche Höhe über dem Boden, sondern die Höhe über dem Startflughafen, wo man den Höhenmesser dem Luftdruck entsprechend korrigiert hatte. Plötzliche Luftdruckänderungen konnten seine Angaben grob verfälschen, weil sie sich auf die Höhenangaben auswirkten – eine Gefahr, die besonders bei Langstreckenflügen bestand. Deshalb setzten sich in jüngster Zeit Höhenmesser durch, die – unbeeinflußt von meteorologischen Vorgängen – auf elektronischem Wege die Flughöhe über dem Boden anzeigen.

In den von uns bisher benutzten Einheiten beträgt der normale Luftdruck 1,033 kp/cm². Diesen Druck nennt man eine „physikalische Atmosphäre" (atm). Der Techniker jedoch

rechnet meistens mit der uns bereits geläufigen „technischen Atmosphäre" (at), die einem Druck von 1 kp/cm² entspricht, also etwas „zu klein" ist. 1 at ist, wie wir uns leicht überlegen können, gleich dem Schweredruck einer 10 m hohen Wassersäule. Das war schon dem Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke (1602 bis 1686) bekannt, der an seinem Hause eine durch mehrere Stockwerke reichende, mit Wasser gefüllte Barometerröhre anbrachte und mit ihrer Hilfe sogar Wetteränderungen vorhersagte.

Guericke setzte auch sonst alle Welt durch seine Versuche mit dem Luftdruck in Erstaunen. Seine „Magdeburger Halbkugeln" werden in keinem Physikbuch vergessen – so auch nicht in diesem. Ihr ganzes Geheimnis war, daß zwei Metallhalbkugeln so aufeinandergelegt wurden, daß man die Luft mit einer gleichfalls von Guericke erfundenen Pumpe aus dem entstandenen Hohlraum entfernen konnte. Geschah das, so drückte der äußere Luftdruck die Kugelhälften mit einer solchen Gewalt zusammen, daß es selbst 16 Pferden nicht gelang, sie voneinander zu trennen. Ließ man Luft in den Hohlraum strömen, so fielen die Kugelhälften von selbst auseinander.

Wir nutzen eine Abart des Guerickeschen Versuchs: Einweckgläser werden durch den Druck der auf ihnen lastenden Luft verschlossen, nachdem durch Erhitzen in ihrem Innenraum zwischen Obst und Deckel ein luftverdünnter Raum geschaffen wurde.

Verkümmerte Magdeburger Halbkugeln sind die Gummisaugfüße, mit denen leichte Gegenstände an der Wand oder an einer Schaufensterscheibe befestigt werden können. Auch die Stubenfliege spaziert mit Hilfe von Saugfüßen, die durch den Luftdruck angepreßt werden, ungefährdet über die Zimmerdecke, und so gibt es noch viele kleinere Lebewesen, die sich „auf Magdeburger Halbkugeln fortbewegen".

Aus einer Büchse, die Tomatensaft, Fruchtsirup oder Milch enthält, läuft keine Flüssigkeit aus, wenn wir im Deckel nur *ein* kleines Loch anbringen. Die Öffnung wird durch den Luftdruck „verschlossen". Man muß für den gleichen Druck auch im Inneren der Büchse sorgen, indem man ein zweites Loch anbringt, durch das Luft in den Hohlraum zwischen Flüssigkeit und Büchse strömen kann.

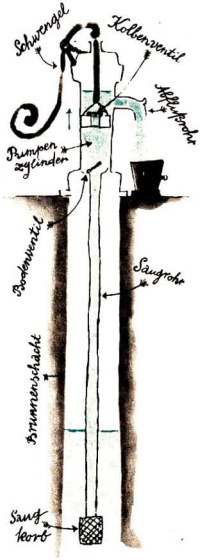
Wie stark die vom Luftdruck ausgeübten Kräfte sind, zeigt ein einfaches Beispiel: Auf die 6 Flächen eines Würfels mit 10 cm Kantenlänge drückt die Luft mit einer Kraft von insgesamt 600 kp. Würden wir den Würfel aus Blech anfertigen

und luftleer pumpen, so würde ihn die Luft unweigerlich vollständig zusammenpressen.

Daß wir im täglichen Leben so wenig vom Luftdruck merken, erklärt sich einfach daraus, daß fast überall Luft vorhanden ist, auch in allen Spalten und Hohlräumen eines Körpers. Der Luftdruck wirkt daher meistens von einander entgegengesetzten Seiten gleichzeitig und hebt sich auf.

Sobald es sich jedoch darum handelt, luftleere oder luftverdünnte Räume herzustellen, tritt der Luftdruck recht deutlich in Erscheinung.

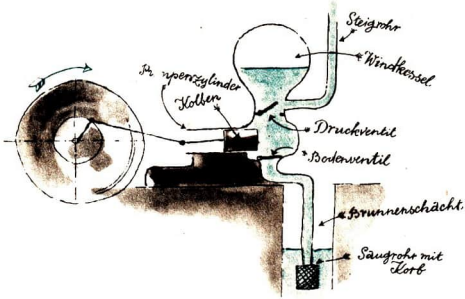
Das ist zum Beispiel der Fall, wenn uns der Luftdruck Wasser pumpen hilft. Das Bild zeigt eine einfache Saugpumpe im Schnitt. Sie wirkt folgendermaßen: Wird der Pumpenschwengel nach unten bewegt, so hebt sich der im Pumpenrohr luft- und wasserdicht gleitende Kolben. Da sich der Hohlraum unter dem Kolben vergrößert, wird die in ihm befindliche Luft verdünnt, und infolgedessen drückt die auf dem Wasserspiegel im Brunnenschacht lastende, äußere Luftsäule Wasser durch das Bodenventil. Beim Niedergehen des Kolbens schließt es sich; gleichzeitig öffnet sich das Kolbenventil, und Wasser steigt in den Raum über dem Kolben. Bei der nächsten Schwengelbewegung wird neues Wasser angesaugt, während das über dem Kolben befindliche Wasser so weit angehoben wird, daß es durch das Abflußrohr ausströmen kann.

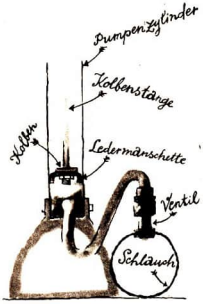


Der äußere Luftdruck also ist es, der bei dieser Pumpe „hebt". Daraus folgt sofort, daß eine solche Pumpe Wasser höchstens aus Tiefen bis zu 10 m fördern kann: denn nur einer Wassersäule von 10 m Höhe hält der äußere Luftdruck das Gleichgewicht. In Wirklichkeit ist die Förderhöhe sogar noch geringer, da sich der Pumpenkolben nicht völlig abdichten läßt.

Wirkungsvoller arbeitet die Druckpumpe. Ihr Kolben enthält kein Ventil. Beim Zurückgehen des Kolbens wird Wasser angesaugt. Beim Vorstoßen des Kolbens wird dieses Wasser bei schließendem Bodenventil in den sogenannten Windkessel und von da in das Steigrohr gedrückt, an dessen oberer Öffnung es ausfließt. Der Luftdruck im Windkessel wirkt fast wie ein Schwungrad und verhindert das stoßweise Ausströmen des Wassers. Auch diese Pumpe darf nur 7 bis 8 m über dem Wasserspiegel aufgestellt werden, dagegen kann das Steigrohr viel länger sein: denn die Steighöhe des Wassers hängt nicht vom Luftdruck, sondern von der Leistungsfähigkeit des Pumpenmotors ab.

Druckpumpe

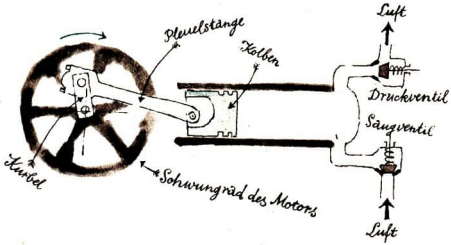




Fahrradpumpe

Die Fahrradpumpe soll einen Überdruck herstellen. Im Pumpenzylinder gleitet ein Kolben, der gegen die Kolbenwand mit einer Ledermanschette abgedichtet ist. Beim Abwärtsbewegen des Kolbens drückt sich die Manschette fest an die Kolbenwand, die Luft wird durch den Pumpenstutzen in das Fahrradventil gedrückt, dessen Gummischlauch Luft nur in einer Richtung passieren läßt. Beim Hochgehen des Pumpenkolbens löst sich die Ledermanschette etwas von der Wand; durch das kleine Loch am oberen Ende des Pumpenzylinders strömt erneut Luft nach, die den Raum unter dem Kolben füllt und beim nächsten Niedergang in das Ventil gedrückt wird.

Kompressoren, die Druckluft für die verschiedenartigsten Zwecke bereitstellen, arbeiten im Prinzip ebenso: Luft wird beim Zurückgehen des Kolbens durch ein Ventil angesaugt und beim Vorgehen des Kolbens durch ein Druckventil ausgestoßen.



Kompressor

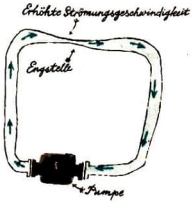
Was da fließt und strömt . . .

In den vorangegangenen Abschnitten haben wir uns die Sache leicht gemacht: Luft und Flüssigkeiten befanden sich in Ruhe. In Wirklichkeit jedoch ist diese Ruhe selten; denn weit öfter begegnen uns strömende Flüssigkeiten oder bewegte Luft. Wir brauchen nur daran zu denken, daß es völlige Windstille so gut wie überhaupt nicht gibt, daß selbst in einem abgeschlossenen Zimmer ein steter Luftaustausch zwischen innen und außen stattfindet, daß nicht nur Bäche und Flüsse strömen, sondern auch in vielen „stehenden" Gewässern schwache Strömungen – hervorgerufen durch den Luftzug oder durch andere Ursachen – vorhanden sind.

Die Strömungslehre, deren Bekanntschaft wir jetzt machen wollen, hat einen ungemein sympathischen Zug. Die strenge Trennung zwischen Flüssigkeit und Gas braucht nicht mehr eingehalten zu werden. Sie ergab sich vor allem daraus, daß Flüssigkeiten sich kaum, Gase dagegen leicht komprimieren lassen. Bei strömenden Flüssigkeiten und Gasen aber wirkt sich dieser Unterschied nicht aus, wenigstens solange nicht, als sich die Geschwindigkeit einer Gasströmung nicht der Schallgeschwindigkeit (340 m/s) nähert. Wir können daher auch strömende Gase als inkompressibel ansehen, und zahlreiche Gesetze der Strömungslehre gelten für Flüssigkeiten *und* für Gase.

Da wir gerade beim Vereinfachen sind, wollen wir gleich zwei weitere Idealisierungen vornehmen: Wir setzen voraus, daß die Flüssigkeits- beziehungsweise die Gasströmung ohne jede Reibung verläuft und daß sich in den Strömungen nirgends Wirbel und Strudel bilden.

Die erste Beziehung, die wir kennenlernen wollen, betrifft die Strömungsgeschwindigkeit. Der geschlossene Wasserkreislauf in unserer Skizze (es könnte sich beispielsweise um Kühlwasser für irgendein Maschinenaggregat handeln) wird durch eine Pumpe aufrechterhalten, die ständig die gleiche Flüssigkeitsmenge, zum Beispiel 5 l/s, fördert. Da die Flüssigkeit nicht kompressibel ist, müssen nicht nur durch die Pumpe, sondern auch durch jeden beliebigen Rohrquerschnitt in der Sekunde 5 l fließen. Daher ist die Strömungsgeschwindigkeit an der Engstelle höher als in den weiten Teilen des Rohrsystems.



Das klingt recht theoretisch, doch läßt sich diese Gesetzmäßigkeit sehr leicht im täglichen Leben beobachten. Die Strömungsgeschwindigkeit eines Flusses nimmt zu, wenn er

sich zwischen Felswänden hindurchzwängen muß; sie läßt nach, wenn der Fluß wieder sein breites Bett einnimmt. Die Gefahren von Stromschnellen, von Barrieren oder im Wasser liegenden Felsblöcken rühren nicht nur daher, daß ein Boot auflaufen kann, sondern entstehen vor allem dadurch, daß sich die Strömungsgeschwindigkeit wegen des verkleinerten Flußquerschnittes steigert.

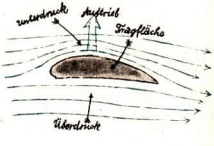
Wer mit einem Gummischlauch möglichst weit spritzen will, drückt das vordere Schlauchende zusammen. Dadurch werden Ausströmgeschwindigkeit des Wassers und Reichweite des Strahls vergrößert. Dasselbe geschieht, wenn Lausbuben den Finger auf die Mündung eines Wasserrohrs pressen.

Die technische Ausführung des zusammengepreßten Gummischlauchendes heißt Düse. Sie wird überall eingesetzt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit oder eines Gases erhöht werden soll. Das gilt für Feuerwehrschläuche ebenso wie für Raketentriebwerke.

Untersuchen wir nun, wie es um den Druck in Strömungen steht. Wir haben dazu an dem Abflußrohr eines Wasserbehälters (Abbildung unten) mehrere Druckmesser (Manometer) angebracht. Solange der Abflußhahn geschlossen bleibt, zeigen alle Manometer den gleichen Druck an, und zwar den Schweredruck am Boden des Wasserbehälters. Das Bild ändert sich, sobald wir den Hahn öffnen. Die Manometer messen dann einen geringeren Druck, wobei besonders auffällt, daß dieser an der Engstelle am niedrigsten ist. Diese Druckverminderung erklärt sich wie folgt: In der Strömung tritt noch eine zweite Art von Druck auf. Man nennt ihn Staudruck, und wir können ihn deutlich spüren, wenn wir eine Platte quer in die Strömung halten. Der Staudruck wird durch die Bewegungsenergie der sich bewegenden Flüssigkeit beziehungsweise des sich bewegenden Gases hervorgerufen, und um ihn vermindert sich der bei geschlossenem Hahn gemessene Schweredruck. Die Manometer zeigen nur diesen verminderten Druck an. Ein mit dem Strom schwimmendes Manometer würde ihn ebenso anzeigen wie die Druckmesser an den Rohrwänden.

Je größer die Strömungsgeschwindigkeit, desto höher wird auch der Staudruck. Je größer der Staudruck, desto geringer der statische Druck. So erklärt es sich also, daß in einer Flüssigkeit dort der geringste statische Druck herrscht, wo sie am schnellsten fließt (daß Manometer 3 ebenfalls einen etwas geringeren Druck als Manometer 1 anzeigt, hat seine Ursache in den in Wirklichkeit unvermeidbaren Reibungsverlusten). Auch das klingt recht abstrakt. Doch gibt es zahlreiche wichtige Auswirkungen dieser Druckbeziehungen. Tauchen zwei Körper dicht nebeneinander in eine Strömung – es ist dabei gleichgültig, ob die Körper sich in stehendem Wasser fortbewegen oder in fließendem Wasser ruhen –, so wird die Flüssigkeit zwischen ihnen zusammengedrängt und fließt schneller. Zwischen den Körpern herrscht infolgedessen ein geringerer statischer Druck als an ihren Außenseiten. Infolgedessen nähern die Körper sich einander. Es entsteht ein „Sog", der Schiffen in einem Kanal sehr gefährlich werden kann.

Wenn wir einen Körper mit dem Profil einer Flugzeugtragfläche in eine strömende Flüssigkeit tauchen, so wird an der nach außen gewölbten Seite die Flüssigkeit etwas zusammengedrängt und fließt schneller, während sie an der Unterseite etwas langsamer strömt. An der Oberseite der Tragfläche entsteht ein Unterdruck, an ihrer Unterseite dagegen ein Überdruck. Insgesamt ergibt sich daraus eine nach oben wirkende Kraft, ein Auftrieb, der allerdings nur durch die Strömung hervorgerufen wird und mit dem Archimedischen Prinzip nichts zu tun hat.

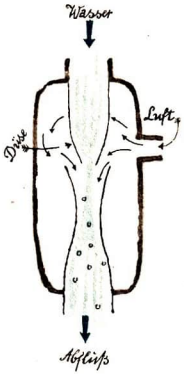


Dieser Auftrieb wird tatsächlich bei Wasserfahrzeugen genutzt. Sowjetische Schiffsbauer und Ingenieure der volkseigenen Roßlauer Werft konstruierten auf dieser Grundlage ganz neuartige Wasserfahrzeuge. Unter dem eigentlichen Schiffsrumpf sind „Tragflächen" angebracht. Bei einer bestimmten Geschwindigkeit wird der durch das strömende Wasser verursachte Auftrieb so groß, daß der Schiffsrumpf sich aus dem Wasser hebt und das Fahrzeug auf den Tragflächen ruht. Der Wasserwiderstand sinkt dadurch sehr ab; die Boote erreichen bei großer Wirtschaftlichkeit hohe Geschwindigkeiten.

Daß wir die Tragfläche zunächst bei Wasserfahrzeugen dargestellt haben, entspricht nicht der historischen Reihenfolge. Die ersten Tragflächen gab es an Flugzeugen. Die Gesetze des Auftriebs aber sind bei ihnen grundsätzlich die gleichen.

Damit sind wir bereits bei Luft- und Gasströmungen. An ihnen lassen sich die Auswirkungen von Druckunterschieden

sogar besonders einfach zeigen. Blasen wir zwischen zwei in geringem Abstand gehaltene Postkarten, so nähern sie sich einander noch mehr. Der statische Druck zwischen ihnen ist geringer als der Druck auf die Außenseiten. Legen wir ein Kartonblatt auf den Kopf einer Pfeife, so wird es bei stetigem Blasen nicht weggeschleudert, sondern festgehalten.



Jede Luftströmung übt auf die langsamere oder ruhende Luft der Umgebung einen Sog aus. Über einer Warmwasser- oder Dampfheizung strömt die erwärmte und daher spezifisch leichtere Luft (vgl. S. 13) nach oben. Bläst man von der Seite Tabakrauch zur Heizung, so ist deutlich zu erkennen, wie er noch vor dem Heizkörper vom Sog erfaßt und nach oben gerissen wird. Bläst der Sturm mit großer Geschwindigkeit über ein Dach, so kann der Druckabfall gegenüber der Luft im Haus so groß werden, daß das Dach abgehoben wird. Im Gasherd nutzen wir diese Saugwirkung gleichfalls aus. Hier kommt es darauf an, die Gasflamme mit genügend viel Verbrennungsluft zu versorgen. Das mit hoher Geschwindigkeit aus einer Düse entweichende Gas saugt die Luft der Umgebung an und vermischt sich mit ihr.

Man kann sogar Luftpumpen nach diesem Prinzip bauen. Besonders einfach ist die bekannte Wasserstrahlluftpumpe. Der einer Düse entströmende Wasserstrahl saugt die Luft aus seiner Umgebung mit großer Heftigkeit an und reißt sie mit; infolgedessen entsteht ein luftverdünnter Raum.

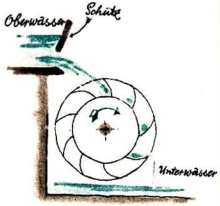
Das umgekehrte Verfahren finden wir beim Parfümzerstäuber oder bei den Spritzpistolen in einer Lackiererei. Hier ist es ein Luftstrahl, dessen Saugwirkung Flüssigkeit aus einem Vorratsbehälter hochreißt und mit der Luft des Strahls vermischt.

Daß strömendes Wasser Arbeit leisten kann, haben wir bereits erwähnt. Die Wasserkraft war neben der relativ seltenen Verwendung des Windes überhaupt die erste Kraftquelle, die dem Menschen neben der Muskelkraft menschlichen und tierischen Ursprungs zur Verfügung stand.

Die einfachsten Wasserkraftmaschinen sind Wasserräder. Bereits vor der Zeitenwende wurden sie hier und da als Antriebsmaschinen für Mühlen und Bewässerungsanlagen benutzt; in späteren Jahrhunderten pumpten sie Schächte aus, versorgten Schmelzöfen mit der nötigen Gebläseluft und lieferten die Antriebskraft für Fabriken.

Sehen wir uns zunächst ein „oberschlächtiges" Wasserrad an. In ihm wird nicht die kinetische Energie, sondern das Gewicht des Wassers zur Arbeitsleistung ausgenutzt. Das

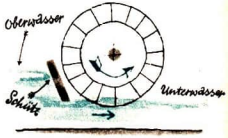
von oben einströmende Wasser füllt die kastenförmigen Radschaufeln. Die gefüllte Seite des Rades bekommt das Übergewicht, und das Rad beginnt sich zu drehen, wobei sich die Schaufeln nach unten entleeren, während oben neue Schaufeln gefüllt werden. Die Leistung oberschlächtiger Wasserräder steigt zwar mit dem Raddurchmesser; sie blieb aber auch bei den größten Wasserrädern (ihr Durchmesser erreichte die Höhe mehrstöckiger Häuser) verhältnismäßig gering und überschritt selten einige Pferdestärken.



Oberschlächtiges Wasserrad

Das „unterschlächtige" Wasserrad nutzt die kinetische Energie des Wassers. Es strömt durch ein Schütz mit hoher Geschwindigkeit auf die Radschaufeln, die in Bewegung gesetzt werden. Auch das unterschlächtige Wasserrad hat heute nur noch historischen Wert.

Unterschlächtiges Wasserrad



Vom Wasserrad führte die Entwicklung zur Turbine, die durch Wasser oder auch durch Dampf angetrieben wird. Dem unterschlächtigen Wasserrad ähnlich ist die sogenannte Pelton- oder Freistrahlturbine. Bei ihr prallt Wasser aus einer oder aus mehreren Düsen mit großer Geschwindigkeit auf die Turbinenschaufeln. Die bessere Wirkung gegenüber dem unterschlächtigen Wasserrad erklärt sich nicht nur aus der hohen Wassergeschwindigkeit, sondern vor allem daraus, daß man den Turbinenschaufeln eine Form gibt, durch die fast die ganze Bewegungsenergie des Wassers auf das Turbinenrad übertragen wird.

Ganz anders sind Kaplan- und Propellerturbinen gebaut. Ihre Laufräder ähneln einer Schiffsschraube. Die Flügel der Laufräder können bei der Kaplanturbine verstellt und der verfügbaren Wassermenge angepaßt werden, während sie bei den besonders einfachen Propellerturbinen feststehen. Kaplanturbinen werden heute schon für Leistungen von mehr als 100000 kW gebaut wie beispielsweise die Kaplanturbinen des Wasserkraftwerkes „Lenin" bei Kuibyschew.

Auf die zahlreichen anderen Turbinenarten einzugehen, müssen wir uns leider versagen.

Laufrad einer Kaplanturbine

Zwischen warm und kalt

„. . . Tageshöchsttemperaturen zwischen 11 und 13 Grad . . ."
In der Urlaubszeit wird Sie diese Formulierung aus dem Wetterbericht nicht gerade begeistern; denn kühles Wetter steht bevor. Nach einer langen Frostperiode dagegen würden Sie bei einer solchen Prognose erleichtert aufatmen: „Na endlich – es wird wieder wärmer!"
Dreierlei haben wir uns eben ins Gedächtnis zurückgerufen: Daß wir den Wärmezustand der Luft wie jedes anderen Stoffes durch seine Temperatur beschreiben, daß wir ihn mit dem Thermometer messen und daß unsere Empfindungen uns, wenn es um die Temperatur geht, manchen Streich spielen. Der menschliche Körper reagiert, je nach den Begleitumständen, auf die gleiche Temperatur ganz verschieden. Das gilt nicht nur für den kühlen Sommer- und den milden Wintertag gleicher Temperatur. Auch sonst erfahren wir es immer wieder. Kein Zimmer kann so kalt sein, daß es uns nicht im ersten Augenblick wundervoll warm erschiene, wenn wir aus Schnee und Frost kommen. Den Hausflur empfinden wir im Winter als kalt, wenn wir ihn von der Wohnung aus betreten; er kommt uns warm vor, wenn wir von der Straße kommen.
Verlassen wir uns daher, wenn wir die Temperatur feststellen wollen, lieber auf das Thermometer. Müssen wir wirklich erklären, wie es funktioniert? Machen wir es kurz: Eine dünne Glasröhre läuft unten in eine Kugel oder in einen zylindrischen Hohlraum aus. Ihr oberes Ende wird zugeschmolzen. Die Kugel und ein Teil des Rohres werden mit Quecksilber oder einer anderen Flüssigkeit gefüllt. Der Raum über dem Quecksilber ist luftleer.
Erwärmt sich das Quecksilber, so dehnt es sich aus; es steigt in der Röhre empor. Die Höhe des Steigens ist ein Maß für die Temperatur. Kühlt sich das Quecksilber ab, so zieht es sich zusammen, die Säule im Rohr sinkt.

Aber das Fieberthermometer bleibt doch „oben"? Sicher, aber nur, weil es im Thermometerrohr über dem Quecksilberbehälter eine Engstelle gibt. Das steigende Quecksilber wird zwar hindurchgepreßt, beim Abkühlen und Zusammenziehen aber reißt die Flüssigkeitssäule an der Engstelle sofort ab. Das Quecksilber im Rohr bleibt stehen und kann nur durch Schütteln (Trägheitskräfte!) zurückgedrückt werden.

Die uns so selbstverständliche Thermometerskala hat unter den Wissenschaftlern des 18. Jahrhunderts zu manchem Streit geführt. Wollte man nicht nur feststellen, „es ist wärmer", so mußte man auch für die Temperatur Einheiten einführen. Dazu aber brauchte man Festpunkte, das heißt, man mußte Naturvorgänge ausfindig machen, die immer bei der gleichen Temperatur ablaufen, und diese Temperaturen mußte man zu Meilensteinen jeder Temperaturmessung machen.

Man kam dabei teilweise auf die merkwürdigsten Ideen: So nahm man etwa den kältesten Wintertag und den heißesten Sommertag als Temperaturmarken, man wählte die menschliche Körpertemperatur und sogar die Schmelztemperatur der Butter als Thermometerfestpunkte. Die Temperaturskala des Instrumentenmachers Daniel Fahrenheit (1686 bis 1736) fand dann als erste weite Verbreitung, und im Alltag der Länder englischer Zunge ist sie noch heute in Gebrauch. Ihr Nullpunkt wurde durch die Temperatur einer Kältemischung aus Schnee und Salmiak festgelegt.

Unsere jetzige Temperaturskala verdanken wir dem schwedischen Astronomen Anders Celsius (1701 bis 1744). Er wählte den Schmelzpunkt des Eises und die Siedetemperatur des Wassers als Festpunkte und teilte den dazwischenliegenden Bereich in 100 gleiche Teile. Dabei übrigens erhielt der Siedepunkt zunächst die Bezeichnung „Null Grad", der Schmelzpunkt des Eises die Bezeichnung „100 Grad". Erst später drehte man die Skala um.

Die Ausdehnung durch Erwärmen ist keine Besonderheit des Quecksilbers. Fast alle Körper dehnen sich aus, wenn man sie erwärmt, und ziehen sich zusammen, wenn man sie abkühlt. Die Moleküle eines Stoffes sind nie in Ruhe, sondern schwingen zum Beispiel in festen Körpern um bestimmte Ruhelagen. Je höher die Temperatur, desto intensiver sind diese Schwingungen. Es ist weder schwer noch falsch, sich vorzustellen, daß die Moleküle sich bei Erwärmung zusätzlichen Platz verschaffen müssen. Daher also die Wärmeausdehnung, die mit steigender Temperatur wächst. Die Wärme selbst aber ist nichts anderes als die den kleinsten Teilchen

eines Körpers innewohnende Bewegungsenergie. Wärme ist also eine Energieform; wir werden uns an anderer Stelle noch ausführlich darüber unterhalten.

Am wenigsten dehnen sich feste Körper aus: Ein 1 m langes Aluminiumrohr wird um 0,5 mm länger, wenn es sich von 0 °C auf Zimmertemperatur erwärmt; ein Stahlrohr dehnt sich unter gleichen Bedingungen um 0,2 mm. Das scheint unbedeutend – aber bereits ein Stahlträger von 30 m Länge wird um 1,6 cm länger, wenn er sich in der Sommersonne um 50 Grad erhitzt; und diese 1,6 cm darf man bei technischen Konstruktionen nicht vernachlässigen. Deshalb hat man für alle Werkstoffe die „Wärmeausdehnungszahl" festgestellt, mit deren Hilfe sich die Längenänderung bei Erhitzung oder Abkühlung jederzeit berechnen läßt.

Genaugenommen verändert sich bei Erwärmung nicht nur die Länge, sondern ein Körper „wächst" auch in den beiden anderen Dimensionen. Diese Volumenänderung ist beispielsweise für Meßgefäße wichtig, deren Rauminhalt mit der Temperatur schwankt, und für die infolgedessen stets auch eine „Eichtemperatur" angegeben wird.

Das bekannteste Beispiel für die Berücksichtigung der Wärmeausdehnung sind Eisenbahnschienen, die niemals „dicht auf dicht" aneinandergefügt werden, da sich sonst Längenänderungen nicht ausgleichen könnten. Trotzdem haben sich in heißen Gebieten bereits Eisenbahnkatastrophen ereignet, als deren Ursache man Schienen ermittelte, die die Hitze verbogen hatte.

Die Fugen in Asphaltdecken von Autostraßen und Flughafenpisten dienen ebenso dem Dehnungsausgleich wie die U-förmigen Dehnungsglieder in langen Rohrleitungen. Stahlbrücken müssen so gelagert werden, daß Längenänderungen keinen Schaden anrichten können; bei Hängebrücken sind besondere Vorrichtungen notwendig, um die Längenänderungen der Tragseile abzufangen.

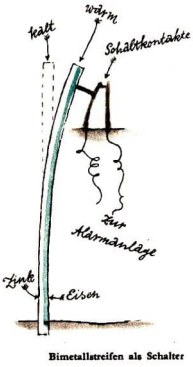
Gußformen in Metallgießereien sind stets etwas größer als das fertige Gußstück, da das flüssige Metall während der Abkühlung „schwindet". Streichinstrumente werden durch jeden Temperaturwechsel empfindlich verstimmt, da sich die Spannung ihrer Saiten und damit die Tonhöhe ändern.

Recht unangenehm macht sich die Wärmeausdehnung bei Glas und manchen keramischen Stoffen bemerkbar. Wird ein Glasgefäß ungleichmäßig erhitzt, zum Beispiel durch rasches Eingießen heißen Wassers, so kommt es nicht sofort zu einem Wärmeausgleich und zu gleichmäßiger Dehnung des ganzen

Gefäßes. Es treten infolgedessen Spannungen auf, die zum Bruch des Glases führen können. Dünnwandige Gefäße sind hier besser dran als dickwandige, denn in jenen kann sich die Temperatur rascher ausgleichen. Bei den so oft zitierten „hauchdünnen japanischen Teetassen" nutzt man diese Tatsache aus, aber auch bei Bechergläsern und Kolben in chemischen Laboratorien. Jenaer Glas und Schmelzgefäße aus Quarz sind deshalb so temperaturbeständig, weil sie neben hoher mechanischer Festigkeit eine so geringe Wärmeausdehnung aufweisen, daß gefährliche innere Spannungen vermieden werden.

Nicht immer tritt uns, wie in den genannten Beispielen, die Wärmeausdehnung als Bösewicht entgegen. Man greift mitunter sogar recht gern auf sie zurück, zum Beispiel dann, wenn man einen Radreifen stark erhitzt, auf den Radkern legt und dort abkühlen läßt. Er zieht sich zusammen und sitzt dann unverrückbar fest. Wenn wir einen Flaschenhals vorsichtig erwärmen, um einen eingeschliffenen Stöpsel zu lösen, oder wenn wir einen festsitzenden Schraubverschluß durch Erhitzen lockern, verlassen wir uns ebenfalls auf die Wärmeausdehnung.

Werden zwei Metallstreifen verschiedener Längenausdehnungszahl aufeinandergelegt und unverrückbar miteinander vernietet, so verbiegen sie sich bei jeder Temperaturänderung. Diese Biegung verhilft uns im Bimetallthermometer zur Temperaturanzeige. Man kann den sich biegenden Streifen aber auch einen elektrischen Kontakt schließen oder öffnen lassen, wodurch Alarm- oder Feuerlöscheinrichtungen, Heizgeräte und andere Einrichtungen selbsttätig gesteuert werden können.

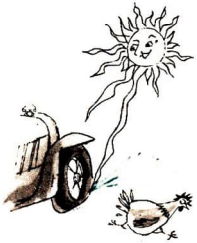


Bimetallstreifen als Schalter

Daß Flüssigkeiten gleichfalls der Wärmeausdehnung unterliegen, hat uns bereits das Quecksilberthermometer gezeigt. Dabei liegen die Verhältnisse jedoch teilweise etwas komplizierter als bei festen Körpern.

Ein besonderer Außenseiter ist das Wasser. Wenn wir es vom Nullpunkt aus langsam erwärmen, zieht es sich zunächst zusammen, wird also dichter. Bei 4 °C nimmt es den geringsten Raum ein, und bei weiterer Erwärmung dehnt es sich wieder aus. Wasser von 4 °C ist demnach am „schwersten", das heißt, 1 cm^3 Wasser wiegt bei 4 °C mehr als bei jeder anderen Temperatur. Das ist wichtig für den Wärmehaushalt der Gewässer: Kühlen sie sich allmählich ab, so sinkt das dichter werdende Oberflächenwasser nach unten, und zwar so lange, bis dicht über dem Grund eine Wasserschicht von 4 °C liegt. Bei

weiterer Abkühlung hört das Absinken des nunmehr wieder spezifisch leichter werdenden Oberflächenwassers auf, und es wird kälter als das darunterliegende. Infolgedessen gefrieren Gewässer stets von oben her. Selbst in strengen Wintern finden wir dicht über dem Boden noch eine Wasserschicht, deren Temperatur über dem Gefrierpunkt liegt. Sie verhindert, daß während der kalten Jahreszeit das Leben im Wasser erlischt.



Am stärksten werden gasförmige Körper durch Temperaturänderungen beeinflußt: Erwärmen wir ein Gas – um welches es sich handelt, ist gleichgültig – um 1 Grad, so wächst sein Rauminhalt um $^1/_{273}$ des Volumens, welches das Gas bei 0 °C einnahm. Bei einer Temperatur von 273 °C hat sich daher der Rauminhalt eines Gases bereits verdoppelt.

Ist das Gas in einem Gefäß eingeschlossen, so kann es sich nicht ausdehnen, daher steigt, wenn es erwärmt wird, sein Druck. Das wird uns mitunter recht drastisch vorgeführt, wenn ein Reifen eines in der prallen Sonne stehenden Fahrzeuges platzt. Der Druck war dann im Inneren wegen der fehlenden Ausdehnungsmöglichkeit so angewachsen, daß Schlauch und Mantel ihm nicht mehr widerstehen konnten.

Äußerst gefährlich kann die Wärmeausdehnung bei Gasflaschen werden, wie sie in Betrieben und Reparaturwerkstätten gebraucht werden. Der in ihnen herrschende hohe Druck kann durch eine Unachtsamkeit (Flasche stand zuerst im Schatten, dann in der Sonne oder nahe einer Wärmequelle) so ansteigen, daß die Flasche mit der Gewalt einer explodierenden Granate zersprengt wird.

Wärme geht mancherlei Wege

Wer sich gerade am Metallgriff einer Bratpfanne verbrannte, wird kaum mit uns darüber diskutieren wollen, warum sich der Griff erhitzte, obwohl er überhaupt nicht mit der Flamme in Berührung kam. Er wird höchstens empört einen Topflappen oder eine Pfanne mit Holzgriff verlangen. Dieser Hilferuf ist getarnte Physik, denn sein Urheber kennt und nutzt die Tatsache, daß nicht alle Körper die Wärme gleich gut fortleiten.

Die Bratpfanne demonstriert eine der Möglichkeiten, die die Wärme hat, sich auszubreiten. Keine Temperaturerhöhung bleibt auf einen Punkt beschränkt. Sie teilt sich stets auch

dessen Umgebung mit, wobei die Teilchen des Körpers an Ort und Stelle bleiben. Das nennt man Wärmeleitung. Die Moleküle schwingen an Stellen erhöhter Temperatur stärker als ihre Nachbarn, erregen aber dann auch diese zu intensiveren Schwingungen, die sich weiteren Molekülen mitteilen. So kommt es, daß schließlich der ganze Körper eine höhere Temperatur annimmt.
Die Geschwindigkeit, mit der die Wärme sich durch einen Körper fortpflanzt, ist von Stoff zu Stoff verschieden. Da sie, wie bereits das Bratpfannenbeispiel erweist, praktisch bedeutsam ist, muß man sie kennen und in Zahlen ausdrücken können. Man tut das mit Hilfe der „Wärmeleitzahl", die experimentell festgestellt und in Tabellen erfaßt wurde.
Unsere Übersicht zeigt einige Wärmeleitzahlen. Um sie anschaulicher zu machen, setzten wir die Wärmeleitzahl des guten Wärmeleiters Silber gleich 100 und bezogen alle anderen Zahlenwerte darauf.

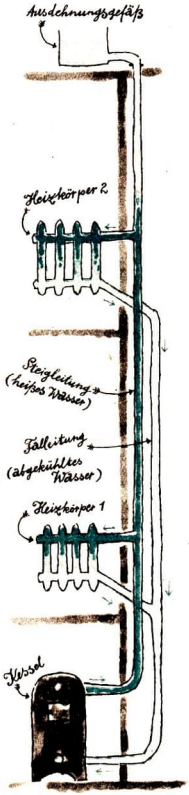
Einige Wärmeleitzahlen (Silber = 100 gesetzt)

Kupfer	92	Schlackenwolle	0,014
Stahl	11,8	Wasser	0,14
Glas	0,22	Luft (bei 0 °C)	0,006
Holz	0,03	Vakuum	0

Mit großem Vorsprung liegen die Metalle an der Spitze. Silber leitet die Wärme fast 500mal besser als Glas.
Überall da, wo es auf gute Wärmeleitfähigkeit ankommt, greift man deshalb zu Metallen. Das ist, um ein Beispiel zu nennen, einer der Gründe, weswegen man die Spitze eines Lötkolbens aus Kupfer anfertigt. Ein Drahtnetz, dicht über einer Flamme angebracht, leitet die Wärme so schnell ab, daß die Flamme nicht durch das Netz schlagen kann. Deshalb stellt der Chemiker Glaskolben beim Erhitzen auf ein Drahtnetz, und deswegen war die offene Flamme früherer Grubenlampen von einem engmaschigen Drahtgeflecht umgeben. Drangen brennbare Gase zur Flamme vor, so verpufften sie, ohne eine Explosion auszulösen, im Drahtkäfig und warnten dadurch gleichzeitig den Bergmann.
Daß uns ein Metallgriff kälter vorkommt als ein Holzgriff gleicher Temperatur, ist ebenfalls eine Folge des unterschiedlichen Wärmeleitvermögens. Die Hautwärme wird vom Me-

tall so rasch abgleitet, daß wir den entsprechenden Wärmeentzug mit aller Deutlichkeit empfinden.
Alle Stoffe leiten die Wärme. Das ist für die Wärmetechnik sehr unangenehm, weil durch ungewollte Wärmeableitung stets Wärmeverluste entstehen. „Wärmedämmende" Stoffe sind deshalb in der Technik sehr gefragt. Dampf- und Fernheizleitungen werden in einen schlechten Wärmeleiter gehüllt, um Wärmeverluste zu vermeiden. Die Griffe von Kochtöpfen, Bügeleisen, Kohlenschaufeln, Tauchsiedern, Schürhaken und Schmelztiegeln werden aus schlechten Wärmeleitern hergestellt. Auch Wasser leitet die Wärme schlecht, vorausgesetzt, daß es nicht zu strömen beginnt.
Der ideale Wärmeisolator ist das Vakuum, denn in ihm fehlen Moleküle, die die Wärmeleitung übernehmen. Beweis: die Thermosflasche mit ihrer Doppelwand und dem luftverdünnten Raum dazwischen.
Unbewegte Luft leitet die Wärme gleichfalls sehr schlecht. Daher stehen poröse Stoffe im Kampf gegen Wärmeverluste an erster Stelle. Holz-, Glas- und Schlackenwolle, Torf, Kork und Watte sind wegen ihres eigenen schlechten Wärmeleitvermögens und wegen ihrer zahlreichen lufterfüllten Poren vorzügliche Wärmeisolatoren. Wir brauchen dabei nicht nur an die Wärmeisolierung von Wänden, Fußböden oder Kühlschränken zu denken. Seit der Mensch sich kleidet, nutzt er die Wärmeisolierung poröser Stoffe aus. Seide ist „kühl", weil sie dünn ist und verhältnismäßig wenig Poren enthält. Der flauschige Pullover „wärmt", weil seine Poren die Ableitung der Körperwärme behindern. Der Pelzmantel würde weit „molliger" sein, wenn seine Besitzerin ihn „linksherum" anzöge. Auch Kochkiste, Federbett, Daunendecke und angerauhte Unterwäsche für den Winter gehören in diese Rubrik. Ihr sind auch die Doppelfenster und die Hohlziegel mit der zwischen ihnen eingeschlossenen Luft zuzuzählen. Die Wirkung der Doppelfenster wäre allerdings noch besser, wenn man den Zwischenraum wabenförmig abteilte und dadurch eine Luftbewegung zwischen den Scheiben unterbände.

Damit sind wir bereits bei einer zweiten Art der Wärmefortpflanzung angelangt, der „Wärmeströmung". Wir finden sie bei flüssigen und gasförmigen Stoffen. Ihr Kennzeichen ist, daß die erwärmten Teilchen selbst sich fortbewegen und so die Wärme transportieren.
Ohne Wärmeströmung wäre es bereits sehr schwer, Wasser auf dem Herd zu erhitzen; und ein Zimmer ließe sich mit dem Ofen überhaupt nicht erwärmen. Doch bleiben wir zunächst



beim Kochtopf: Zuerst werden die Wasserteilchen über dem Boden erwärmt. Die Flüssigkeit dehnt sich aus, wird spezifisch leichter als die darüberliegenden Schichten und steigt nach oben. Kälteres Wasser sinkt nach unten, wird erwärmt und steigt gleichfalls. Es entsteht ein Kreislauf, den man zum Beispiel an einer aufgesetzten Erbsensuppe gut beobachten kann. Bei diesem Kreislauf nehmen allmählich alle Teile der Flüssigkeit gleiche Temperatur an.

Ein „vergrößerter" Kochtopf ist die Warmwasserheizung. Das im Ofen erhitzte Wasser steigt hoch und fließt in die Heizkörper und in ein Ausdehnungsgefäß (Wärmeausdehnung des Wassers!). Es gibt seine Wärme teilweise ab und strömt abgekühlt von neuem in die Heizröhren des Ofens.

An den Heizkörpern wie auch an jedem anderen Ofen begegnet uns die Wärmeströmung gleich noch einmal: Die an den Rippen der Heizkörper oder an den Ofenkacheln vorbeistreichende Luft erwärmt sich, steigt hoch und macht nachströmender, kühler Luft Platz. Damit rasch eine möglichst große Luftmenge erwärmt wird, vergrößert man die Oberfläche der Heizkörper durch die Aufteilung in Rippen.

Die Luft- und Wasserkühlung von Motoren beruht ebenfalls auf dem Prinzip der Wärmeströmung. Die häufig vorhandenen „Kühlrippen" haben die gleiche Aufgabe wie die Heizkörper: Ihre große Oberfläche soll die Wärme möglichst schnell an das vorbeiströmende Kühlmittel abgeben.

Daß die Sonne die Erde erwärmt, läßt sich weder durch Wärmeleitung noch durch Wärmeströmung erklären, denn im Weltraum gibt es keinen Stoff, der Wärme durch Strömung oder durch Leitung übertragen könnte. Wärme kann sich jedoch noch auf eine dritte Weise fortpflanzen: Jeder Körper sendet elektromagnetische Wellen aus, sogenannte „Infrarotstrahlung" (vgl. S. 195), die sich von Rundfunkwellen nur durch ihre Wellenlänge unterscheiden. Treffen sie einen anderen, kälteren Gegenstand, so erwärmt auch dieser sich. Der Raum dazwischen braucht nicht von Stoff erfüllt zu sein. Diese Art der Wärmefortpflanzung heißt „Wärmestrahlung". Ihre uns geläufigsten Vertreter sind Heizsonnen und vor allem „Infrarotstrahler", doch auch der Zimmerofen, das Bügeleisen, der menschliche Körper, kurz, alle Gegenstände und Lebewesen sind „nebenbei" Wärmestrahler.

Die Infrarotstrahlung dringt bis zu einer gewissen Tiefe in die Körper ein und erwärmt sie gewissermaßen „von innen heraus". Das ist für viele technische Aufgaben sehr wertvoll. Man kann mit Infrarotstrahlern Farben, Lacke und Leim

rasch und gleichmäßig trocknen, man kann mit ihnen backen und grillen, und zwar in viel kürzerer Zeit als mit den bisher üblichen Verfahren. Deswegen gewinnt die Infrarottechnik von Jahr zu Jahr an Bedeutung.
Die Wärmestrahlung hat manches mit dem Licht gemeinsam: Sie breitet sich geradlinig aus, und sie läßt sich durch Spiegel umlenken und sammeln. Einen großen Unterschied zum Licht allerdings gibt es: Gewöhnliches Glas ist für Wärmestrahlen nur wenig durchlässig.
Helle oder spiegelnde Flächen werfen den größten Teil der sie treffenden Wärmestrahlung zurück. Deswegen ist der Glaskörper einer Thermosflasche „verspiegelt". Die durch Strahlung entweichende Wärme wird stets in das Flascheninnere zurückgelenkt.
Rauhe, dunkle Körper „verschlucken" die Wärmestrahlung zum größten Teil und erwärmen sich infolgedessen rasch. Eine dunkle Tischplatte wird in der Sommersonne recht heiß; sie bleibt kühl, wenn man eine helle Decke auflegt. Die helle Sommerkleidung, die weißen Häuser in den Tropen sollen ebenfalls möglichst viel Wärmestrahlen zurückwerfen.
Schnee schmilzt stets zuerst in der Nachbarschaft dunkler Körper. In der Volksrepublik China experimentiert man mit einer großartigen Anwendung dieser Erscheinung: Bestreut man Schneeflächen mit Asche, Kohlenstaub oder einem anderen dunklen Stoff, so kann ihr Abtauen beschleunigt werden. Vielleicht wird diese an Einfachheit kaum zu überbietende Methode eines Tages dabei helfen, die plötzliche Schneeschmelze des Frühjahrs über einen längeren Zeitraum zu verteilen.

Die Temperatur erhält Gesellschaft

Kleine, mittlere und große Töpfe gibt es im Haushalt, und „natürlich" braucht das Wasser im vollen großen Topf am längsten, ehe es zu kochen beginnt. Doch wieso eigentlich „natürlich"? In *allen* Töpfen zeigt ein Thermometer bei Beginn des Kochens eine Temperatur von 100 °C an.
Ein großes und ein kleines Zimmer, in beiden gleiche Öfen: „Selbstverständlich" ist der Verbrauch an Heizmaterial für das große Zimmer größer als für das kleine. Warum „selbstverständlich"? In beiden Räumen herrscht eine Temperatur von 20 °C.

Lassen wir es genug sein, Sie haben die Antwort längst bereit: „Natürlich" und „selbstverständlich" deshalb, weil man einem großen Topf und einem großen Raum mehr Wärme zuführen muß als kleinen, wenn die gleiche Temperatur erreicht werden soll.

Wärmezufuhr: ein Begriff, der uns immer wieder begegnet. *Ihn* beschreibt die Temperatur allein nicht; sie mißt nur einen Zustand; wie er herbeigeführt wurde, darüber sagt sie nichts.

Um einen Körper auf eine bestimmte Temperatur zu bringen, müssen wir ihm Wärme zuführen. Das klingt recht verdächtig – so, als sei die Wärme ein Stoff wie Wasser oder Mehl, der auf einen Körper übertragen wird. Das ist, wie wir bereits wissen, nicht der Fall. Gestehen müssen wir jedoch, daß man bis ins 19. Jahrhundert tatsächlich die Wärme als einen Stoff, gewissermaßen als eine unsichtbare Flüssigkeit betrachtet hat. „Füllte" man einen Gegenstand mit diesem Wärmestoff, so wurde er wärmer; entzog man ihm Wärmestoff, so kühlte er sich ab. Bei der Wärmeleitung aber floß der Wärmestoff allmählich durch den Körper und breitete sich aus. Wir können die damals gebräuchlichen Ausdrücke getrost weiterverwenden – wenn wir nur nicht darauf verfallen, die Wärme wiegen zu wollen.

Es wird uns auch deshalb nicht sonderlich überraschen, daß wir jetzt als neuen Begriff die „Wärmemenge" einführen. Sie charakterisiert die Wärme, die einem Körper zugeführt oder entzogen werden muß, damit er eine bestimmte Temperatur erreicht. Die Einheit der Wärmemenge ist dem Namen nach jedermann bekannt: Es ist die Kalorie (cal) beziehungsweise die Kilokalorie (kcal). Sie entspricht der Wärme, die man einem Gramm – oder einem Kilogramm – Wasser zuführen muß, damit seine Temperatur sich um 1 Grad erhöht. Die exakte physikalische Definition schreibt vor, daß diese Erwärmung von 14,5 auf 15,5 °C (etwa Temperatur des Leitungswassers) zu erfolgen habe. Diese Begrenzung ist notwendig, weil die zuzuführende Wärme auch von der Ausgangstemperatur des Wassers abhängt. Allerdings sind die bei anderen Temperaturen auftretenden Unterschiede derart gering, daß man sie in der Praxis meistens unbeachtet lassen kann.

Zur Erwärmung der doppelten, dreifachen, vierfachen Wassermenge ist die doppelte, dreifache, vierfache Kalorienzahl notwendig. Bleibt die Wassermenge gleich, und soll dafür die Temperaturerhöhung verdoppelt, verdreifacht werden, so ist ebenfalls die zwei-, dreifache Wärmemenge notwendig.

Damit zum Beispiel 50 kg Wasser von 10 auf 15 °C erwärmt werden, sind 50 · 5, also 250 kcal erforderlich. Kühlt sich ein Kilogramm Wasser von 80 °C auf 30 °C ab, so „verliert" es eine Wärmemenge von 50 kcal.

Würden wir nacheinander ein Kilogramm Wasser und dann ein Kilogramm eines anderen Stoffes, zum Beispiel eines Metalls, auf der gleichen Gasflamme und gleich lange erhitzen, so würden wir feststellen, daß das Metall bedeutend heißer wird als das Wasser (wobei die Heizzeit so beschränkt werde, daß das Wasser nicht zu sieden beginnt). Wir können aber annehmen, daß die Gasflamme an das Wasser und an das Metall die gleiche Wärmemenge abgegeben hat. Wir müssen daher schließen, daß Metall sich „leichter" erwärmen läßt als Wasser.

Am Prinzip unserer Feststellung würde sich auch nichts ändern, wenn ein Physiker den Versuch mit allen Hilfsmitteln moderner Meßtechnik wiederholte. Es ist nun einmal so: Die gleiche Wärmemenge bewirkt in Körpern gleicher Masse, aber aus verschiedenem Material, verschieden große Temperaturveränderungen.

So haben wir uns neben der Wärmeleitzahl und der Ausdehnungszahl noch mit einer weiteren „Materialkonstante" zu beschäftigen. Es ist die „spezifische Wärme" eines Stoffes. Der Physiker definiert: Unter der spezifischen Wärme eines Stoffes versteht man die Wärmemenge, die ein Kilogramm des Stoffes um ein Grad erwärmt.

Gemessen wird die spezifische Wärme daher in „Kilokalorien je Kilogramm und Grad" (kcal/kg · °C).

Spezifische Wärme einiger Stoffe (in kcal/kg · °C)

Wasser	1	Eisen	0,111
Eis	0,5	Kupfer	0,092
Luft (bei 760 Torr)	0,24	Holz	0,57
Aluminium	0,214	Erdboden	0,22

Kennt man die spezifische Wärme eines Stoffes, so kann man leicht ausrechnen, welche Wärmemengen gebraucht werden, um ihn auf eine bestimmte Temperatur zu bringen, beziehungsweise welche Wärmemengen er beim Abkühlen abgibt. Derartige Berechnungen sind keine müßige Spielerei. Soll ein Heiz- oder Schmelzofen gebaut werden, so kann man

nicht erst am fertigen Ofen probieren, ob die von seiner Heizanlage gelieferte Wärme ausreicht. Damit ein elektrisches Bügeleisen weder zu kühl noch zu heiß wird, muß man die Wärmemenge kennen, die seine Heizspiralen abgeben müssen. Bei der Berechnung von Klimaanlagen, Dampfkesseln und Kühleinrichtungen ist die Kenntnis der spezifischen Wärme ebenfalls unentbehrlich.

Die Tabelle der spezifischen Wärme ist sehr lückenhaft. Aber sie zeigt bereits, daß auch hier wieder Wasser eine Ausnahmestellung einnimmt. In der Tat weist das Wasser – von wenigen Ausnahmen sei abgesehen – eine größere spezifische Wärme als alle anderen Stoffe auf. Um einen Kubikmeter Wasser von 0 °C auf 20 °C, 25 °C oder eine beliebige andere Temperatur zu erwärmen, ist etwa fünfmal soviel Wärme erforderlich, als wenn wir die gleiche Masse Erdreich auf diese Temperatur bringen wollten.

Der Wärmehaushalt und die klimatischen Verhältnisse der Erde werden von dieser Besonderheit des Wassers stark beeinflußt. Das Festland erwärmt sich viel rascher als große Seen oder ein Ozean. Die Wassertemperatur steigt auch bei kräftiger Sonneneinstrahlung nur langsam an. Dafür aber werden im Wasser große Wärmemengen gespeichert, die bei seiner allmählichen Abkühlung wieder abgegeben werden.

Während sich das Land über Nacht rasch abkühlt, verändert sich die Temperatur der Gewässer während der Nachtstunden nur sehr geringfügig. Sogar in den Wintermonaten geben die Ozeane große Wärmemengen ab und mildern das Klima küstennaher Gebiete.

Auch die Technik macht Gebrauch von der großen spezifischen Wärme des Wassers: Wo Wärme „abfällt", und das ist bei vielen Produktionsprozessen der Fall, erhitzt man mit ihrer Hilfe häufig Wasser, das dann für die verschiedensten Zwecke weiterverwendet werden kann. Wasser ist ein einfacher, billiger und wirksamer Wärmespeicher.

Stoffe zwischen kalt und heiß

Es wird Frühling. Schnee rutscht von den Dächern und schmilzt allmählich zusammen; die Eisflächen werden dünner und brechen auf; erdbraune, schneefreie Flecken wachsen, vereinigen sich und bedrängen die letzten Schneewehen von allen Seiten.

Ist Ihnen eigentlich schon einmal aufgefallen, daß sich die wärmende Frühlingssonne am Beginn des Tauwetters, wenn noch alles von Schnee und Eis bedeckt ist, nur schwach bemerkbar macht? „Warm" wird es draußen erst, wenn der Schnee ganz oder doch bis auf einen kleinen Rest verschwunden ist.
Vermutlich haben Sie die richtige Erklärung bei der Hand: Der größte Teil der Sonnenwärme wird zunächst zum Schmelzen von Schnee und Eis benötigt. Erst wenn diese Arbeit getan ist, wird genügend Wärme frei, um die Lufttemperatur rasch zu erhöhen.
Daß tatsächlich viel Wärme erforderlich ist, damit gefrorenes Wasser wieder flüssig wird, können Sie leicht nachprüfen. Allerdings dürfen Sie mit dem Versuch nicht bis zum Frühjahr warten:
Füllen Sie bei strengem Frost einen Topf mit Schnee oder mit Eisstücken, stecken Sie ein Thermometer hinein und setzen Sie das Ganze in die Nähe des Ofens.
Sehr bald beginnt die Quecksilbersäule des Thermometers, das anfänglich vielleicht −10 oder −12 °C anzeigte, zu steigen. Aus der Zimmerluft geht Wärme auf den Schnee beziehungsweise das Eis über. Sobald die Temperatur 0 °C erreicht ist, beginnt das Schmelzen. Dabei aber bleibt – auch in unmittelbarer Ofennähe – die Quecksilbersäule hartnäckig so lange auf 0 °C stehen, bis der letzte Schnee oder das letzte Eisstückchen geschmolzen ist. Dann erst klettert sie weiter.
Ähnliches, wenn auch in einem anderen Temperaturbereich, könnten Sie beim Schmelzen von Blei, Zinn, Wachs oder anderen Stoffen feststellen: Die Temperatur steigt zunächst stetig, verharrt bei der sogenannten Schmelztemperatur, bis der ganze Stoff flüssig geworden ist, und nimmt dann weiter zu. Auch während des „Anhaltens" der Temperatur hört jedoch die Wärmezufuhr nicht auf: Das schmelzende Eis entzieht der Zimmerluft nach wie vor Wärme; die Flamme unter dem Tiegel mit Zinn, Blei oder Wachs brennt weiter.
Wo bleibt die während des Verharrens der Temperatur zugeführte Wärme? Wie erklärt es sich, daß wir keine weitere Temperaturerhöhung beobachten können, solange sich in der Schmelze noch feste Teile des Körpers befinden?
Wir wissen bereits, daß die Moleküle eines Körpers keine Ruhe kennen. Die Moleküle eines festen Stoffes sind zwar an bestimmte Plätze gebunden, die sie nicht verlassen können, doch sie schwingen ständig um eine Mittellage hin und her. Führen wir dem Körper Wärme zu, so werden diese

Schwingungen intensiver, die Schwingungsweite vergrößert sich immer mehr, und schließlich, bei der Schmelztemperatur, werden die Schwingungen so heftig, daß die Moleküle ihre feste Anordnung sprengen und ihre Plätze verlassen können: Der Körper schmilzt. Für diesen Übergang, für dieses Zerstören der ursprünglichen Molekülanordnung ist ein erheblicher Energiebetrag notwendig, die sogenannte „Schmelzwärme". Sie muß von der den Körper erhitzenden Wärmequelle aufgebracht werden. So kommt es, daß ein Körper während des Schmelzens keine Temperaturerhöhung erfährt: Alle zugeführte Wärme wird dazu verwendet, die Fesseln zu sprengen, die die Moleküle an ihren Plätzen festhielten.

Viele Stoffe, zum Beispiel die Metalle, schmelzen bei einer ganz bestimmten, stets gleichbleibenden Temperatur. Sie wird so genau eingehalten, daß man mit ihrer Hilfe Thermometer eicht und kontrolliert. Körper, die aus einem Gemisch mehrerer Substanzen bestehen, besitzen häufig keinen genau festzulegenden Schmelzpunkt: Butter, Wachs, Glas werden bei steigender Temperatur immer weicher und dünnflüssiger.

Hüten wir uns vor Verwechslungen: Bei der Schmelz*temperatur* wird ein fester Körper flüssig, wenn ihm ein entsprechender Energiebetrag als Schmelz*wärme* zugeführt wird. Zinn zum Beispiel schmilzt bei 232 °C, aber nur, wenn dem auf diese Temperatur erhitzten Metall eine Schmelzwärme von 14,5 cal je g zugeleitet wird.

Wasser ist eine Flüssigkeit sehr hoher Schmelzwärme: 80 cal sind nötig, um 1 g Eis von 0 °C in Wasser der gleichen Temperatur zu verwandeln. Daraus erklärt sich, daß der Schnee auch bei ungehinderter Sonneneinstrahlung verhältnismäßig langsam schmilzt. Wir sollten recht froh darüber sein: Wäre die Schmelzwärme des Wassers erheblich geringer, so käme es wegen der raschen Schneeschmelze in jedem Frühjahr zu verheerenden Überschwemmungen, und große Wassermengen flössen ungenutzt ins Meer.

Ehe es draußen tauen kann, muß es frieren. Entzieht man einer Flüssigkeit Wärmeenergie, indem man sie abkühlt, so verliert die Bewegung ihrer Moleküle an Intensität, und bei einer bestimmten Temperatur „erstarrt" die Flüssigkeit: Ihre Moleküle können nicht mehr „wandern", sondern nur noch an Ort und Stelle schwingen. Schmelz- und Erstarrungstemperatur eines Stoffes sind gleich. Die Temperatur von 0 °C ist gleichzeitig Schmelzpunkt des Eises und Gefrierpunkt des Wassers.

In einer Flüssigkeit ist die irgendwann einmal zugeführte „Schmelzwärme" verborgen. Sie kommt als „Erstarrungswärme" wieder zum Vorschein, wenn die Flüssigkeit erstarrt: Gefrierendes Wasser gibt je Gramm 80 cal ab. So erklärt sich die bekannte Tatsache, daß ein eisigkalter Nordwind gemildert wird, wenn er über einen gefrierenden See streicht.

Schmelzen und Erstarren sind, wie nicht anders zu erwarten, auch mit Veränderungen des Rauminhaltes verbunden. Flüssige Metalle beanspruchen ein größeres Volumen als feste, und bei Gußformen, in denen Metalle erstarren sollen, muß dieser „Schwund" berücksichtigt werden.

Die Oberfläche festgewordenen Fettes ist immer etwas nach innen gewölbt – eine Folge der beim Erstarren eintretenden Volumenverminderung.

Da ein schmelzender Körper sich ausdehnt, sinkt seine Wichte: Ein Eisenstück geht infolgedessen in flüssigem Eisen unter; ein Stückchen Butter sinkt in ausgelassener Butter auf den Grund.

Auch hier wieder bildet das Wasser eine Ausnahme: Sein Rauminhalt *vergrößert* sich beim Erstarren, und zwar um den nicht unerheblichen Betrag von etwa 9 %. Eis ist infolgedessen spezifisch leichter als Wasser und schwimmt.

Diese Besonderheit des Wassers kann sehr unangenehm werden: Ein mit Wasser gefülltes, geschlossenes Gefäß zerspringt, wenn sein Inhalt erstarrt. Beim Zerfrieren von Kraftwagenkühlern und von Wasserleitungen werden wir leider sehr oft zu unfreiwilligen Zeugen dieser Erscheinung. Es genügt daher auch nicht, bei Gefahr strengen Frostes das Wasser nur „abzustellen" – die Leitungen müssen entleert werden, wenn ihr Platzen vermieden werden soll.

Felsblöcke, in deren Ritzen sich Wasser angesammelt hat, werden durch das entstehende Eis zersprengt. Holzklötze, an denen wir uns im Herbst mit der Axt vergeblich versuchten, zeigen im Frühjahr zahlreiche Risse und lassen sich leicht spalten, weil die Sprengwirkung des gefrierenden Wassers ihr Gefüge auflockerte.

Daß heißer Kaffee sich rascher abkühlt, wenn man Zucker hineinwirft und umrührt, ist Ihnen sicher bekannt. Wenn Sie Kochsalz in Wasser auflösen, können Sie gleichfalls ein Absinken der Temperatur beobachten. Nicht nur beim Schmelzen, sondern auch beim Auflösen eines festen Körpers verlassen seine Moleküle ihre „festen" Plätze. Dazu aber ist, wie beim Schmelzen, Wärme nötig. Da es eine besondere Wärmequelle im allgemeinen dabei nicht gibt, entzieht der feste

Körper die „Lösungswärme" seiner Umgebung: Er kühlt die Flüssigkeit ab, in der er sich löst. In den vergangenen Jahren wurden besondere „Kühlsalze" geschaffen, bei denen die Lösungswärme und damit die Abkühlung der Flüssigkeit besonders groß sind. Man kann mit ihnen Lebensmittel frischhalten.

Noch ein weiterer wichtiger Effekt zeigt sich beim Lösen: Der Gefrierpunkt (Erstarrungstemperatur) einer Lösung liegt niedriger als der Gefrierpunkt des „Lösungsmittels", das heißt der auflösenden Flüssigkeit. Meerwasser zum Beispiel gefriert nicht bei 0 °C, sondern – je nach Salzgehalt – etwas darunter. Mischt man Schnee mit Kochsalz, so schmilzt er infolge der „Gefrierpunktserniedrigung". Diese Erscheinung hilft im Winter beim Auftauen von Weichen und Kanaldeckeln immer wieder. Daß man Transportbänder und Baggerketten mit einer Salzlösung besprüht, wenn Frost bevorsteht, dient dem gleichen Zweck.

Die Temperatur sinkt bei Lösungsvorgängen unter Umständen sehr erheblich: Mischt man Eis und Kochsalz im Verhältnis 3 : 1, so erreicht man Temperaturen bis zu −21 °C; beim Bereiten von Speiseeis wird die „Kältemischung" Eis – Kochsalz fast immer verwendet. Bei einer Kältemischung aus Eisstückchen und Chlorkalzium kommt man sogar auf −50 °C und darunter. Man bedient sich einer solchen Mischung zum Beispiel in Laboratorien, wenn eine einfache, aber wirksame Kühlung verlangt wird.

Zwischen Topf und Deckel

Eine Flüssigkeit kann nicht nur erstarren und damit fest werden, sondern auch in einen Zustand übergehen, in dem zwischen ihren Molekülen kaum noch ein Zusammenhang besteht: Sie kann verdampfen.

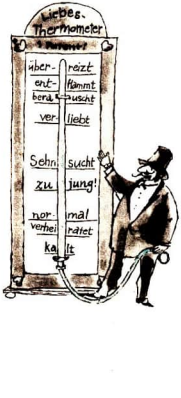
Wie eine Flüssigkeit verdampft, können wir jederzeit in der Küche beobachten: Steigt die Temperatur in einem Wassertopf auf dem Herd allmählich an, so setzen sich bereits nach kurzer Zeit kleine Gasbläschen an seinen Wänden ab. Diese Bläschen enthalten Luft, die stets in geringen Mengen im Wasser gelöst ist (Atmung der Fische!). Sie haben mit dem eigentlichen Verdampfen nichts zu tun, sondern scheiden sich bei jeder Temperaturerhöhung ab. Bereits an einem Glas „abgestandenen" Wassers können wir sie beobachten.

Wird das Wasser im Topf heißer, so bilden sich auf dem Boden Blasen, die emporsteigen und dabei größtenteils wieder verschwinden. Es ist Dampf, der jedoch in Wasser zurückverwandelt wird, sobald er in kühlere Wasserschichten kommt. Gleichzeitig hören wir den Topf „singen".
Wenig später vermehrt sich die Zahl der Gasblasen rasch. Die Flüssigkeitsoberfläche gerät in heftige Wallung. Das Wasser kocht und verwandelt sich in Wasserdampf. Entgegen einer weitverbreiteten Meinung können wir ihn nicht emporsteigen sehen: Wasserdampf ist unsichtbar. Was wir als Dampf „sehen", ist in Wirklichkeit bereits wieder Nebel, der aus ungezählten winzigen Wassertropfen besteht.
Überprüfen wir das Erhitzen und Kochen des Wassers mit einem Thermometer, so zeigt dieses zunächst eine ständig und stetig steigende Temperatur. Am „Siedepunkt" des Wassers, bei 100 °C, bleibt die Quecksilbersäule stehen.
Nachdem wir die „Schmelzwärme" kennengelernt haben, wird uns das nicht mehr allzusehr überraschen: Im Augenblick, da die Flüssigkeit in Dampf übergeht, müssen die zwischen ihren Molekülen wirkenden Anziehungskräfte (vgl. S. 97) überwunden und die Entfernungen zwischen den Molekülen vergrößert werden. Dazu ist Energie erforderlich, die sogenannte „Verdampfungswärme". Sobald die Flüssigkeit ihre Siedetemperatur – sie ist von Stoff zu Stoff verschieden – erreicht hat, wird alle weiterhin zugeführte Wärme zum „Sprengen" der zwischen den Molekülen wirkenden Anziehung verbraucht; für eine Temperaturerhöhung bleibt keine Wärme übrig.
Auch hier müssen wir uns wieder vor Verwechslungen hüten: Eine Flüssigkeit *kann* bei der Siedetemperatur in Dampf übergehen; doch sie tut es nur, wenn ihr die notwendige Energie als Verdampfungswärme (gleichfalls von Stoff zu Stoff verschieden) zugeführt wird.
Um 1 kg Wasser von Zimmertemperatur auf den Siedepunkt zu erhitzen, sind 80 kcal erforderlich. Um dieses Kilogramm Wasser von 100 °C in Dampf der gleichen Temperatur zu überführen, müssen weitere 539 kcal zugeführt werden. Die Verdampfungswärme ist also fast siebenmal höher als die Wärmemenge, die wir brauchen, um das Wasser auf Siedetemperatur zu bringen. Deshalb kommt ein Topf mit Wasser zwar schnell bis zum Kochen, doch es dauert lange, ehe er „leergekocht" ist.
In einem offenen Gefäß läßt sich Wasser nur auf eine Temperatur von 100 °C bringen; bei einer weiteren Wärmezufuhr

verwandelt es sich in Dampf. Stoffe, die keine höhere Temperatur vertragen, werden deshalb im „Wasserbad" erhitzt: Man gibt sie in ein Gefäß, das in einen größeren, mit Wasser gefüllten Topf gehängt wird. Solange die Badflüssigkeit nicht restlos verkocht ist, steigt die Temperatur nicht über 100 °C an. Beim Leimkochen, beim Garkochen leicht „anbrennender" Hülsenfrüchte und beim Abkochen der Milch machen wir von dieser durch das Wasserbad gezogenen Temperaturgrenze gern Gebrauch.

Daß man den Siedepunkt des Wassers allgemein mit 100 °C angibt, ist nicht exakt: Der Siedepunkt einer Flüssigkeit hängt von dem Druck ab, der auf ihr lastet. Luft oder auch ein anderes Gas sucht die Dampfbildung zu verhindern; und eine Flüssigkeit kann nur kochen, wenn der Druck der entstehenden Gasblasen den auf die Flüssigkeit wirkenden Druck überwindet. Siedepunktsangaben gelten daher stets nur für einen ganz bestimmten äußeren Druck. Meistens bezieht man sie auf den Normaldruck von 760 Torr.

Auf einem Berg ist der Luftdruck geringer als im Tal. Infolgedessen siedet Wasser auf dem Gipfel bereits bei niedrigerer Temperatur als am Fuße eines Berges. Würden wir auf dem Montblanc (4800 m) Wasser kochen, so zeigte das Thermometer am Siedepunkt 84 °C an. In 10 000 m Höhe wäre die Siedetemperatur bereits auf etwa 65 °C abgesunken.



Pumpt man einen großen Teil der Luft aus einem Gefäß, das Flüssigkeit enthält, so kann man diese bereits bei sehr niedrigen Temperaturen zum Sieden bringen. So wurden auf Jahrmärkten früher allerhand Scharlatanerien mit bizarr geformten Glasröhren getrieben, die angeblich die „Kraft" des Blutes maßen. Sie enthielten nichts als gefärbtes Wasser und darüber einen luftverdünnten Raum, dessen Druck so niedrig war, daß die Flüssigkeit bereits zu sieden begann, wenn man die Glasröhren nur in die Hand nahm und der Körperwärme aussetzte.

Es gibt aber auch weit vernünftigere Anwendungen des Zusammenhangs zwischen Druck und Siedetemperatur. Man kann ihn zum Beispiel für Höhenmessungen benutzen: Mit einem sogenannten „Hypsometer" wird sehr genau der Siedepunkt von Wasser bestimmt; daraus errechnet man den Luftdruck, und aus ihm wieder bestimmt man die Höhe über dem Meeresspiegel.

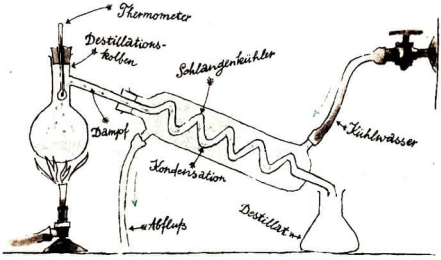
Nimmt der auf einer Flüssigkeit lastende Druck zu, so verschiebt sich der Siedepunkt nach oben: Schon bei 10 at siedet Wasser erst bei 179 °C; bei 85 at erreicht seine Siedetempe-

ratur bereits 300 °C. In modernen Dampfkesseln, die mit noch weit höheren Drücken und Temperaturen arbeiten, „kocht" das Speisewasser erst bei Temperaturen von einigen hundert Grad.

Kühlt sich Dampf unter den Siedepunkt ab, so verwandelt er sich in Flüssigkeit zurück, er „kondensiert". Die Wassertröpfchen am Topfdeckel sind das bekannteste Beispiel dafür. Dort, wo Dampf für technische Zwecke benutzt wird – beispielsweise zum Antrieb von Dampfmaschinen oder -turbinen – wird das Kondensieren bewußt gefördert: Man kann so einen großen Teil des verdampften Wassers zurückgewinnen und dem Kessel wieder zuführen. Da das Speisewasser von Kesselanlagen vorher sorgfältig enthärtet und gereinigt werden muß, bedeutet das eine erhebliche Ersparnis beim Betrieb von Dampfkraftanlagen. Vor allem aber wird dadurch der Wirkungsgrad einer Dampfkraftanlage erhöht.

Das Wechselspiel Verdampfen–Kondensieren bildet auch die Grundlage des Destillierens: Enthält Wasser oder eine andere Flüssigkeit unerwünschte Beimischungen, so kann man diese entfernen, indem man das Wasser in Dampf umwandelt, der anschließend wieder kondensiert wird. Die Fremdstoffe bleiben im Verdampfungsgefäß zurück. Auch Stoffe mit verschiedenem Siedepunkt, zum Beispiel Wasser und Alkohol, lassen sich auf diese Weise trennen. Das Destillieren, dessen Prinzip unsere Abbildung zeigt, ist daher eines der wichtigsten Arbeitsverfahren der chemischen Industrie.

Der verdampfenden Flüssigkeit wird eine recht erhebliche Verdampfungswärme zugeführt. Wir erhalten sie als „Kondensationswärme" zurück, wenn der Dampf wieder in den flüssigen Zustand übergeht. Jede Destilliereinrichtung muß gekühlt werden, damit die Kondensationswärme abgeführt



wird; die in Dampfheizungen freiwerdende Kondensationswärme heizt Betriebe und Wohnungen, und die in Kraftwerken anfallende Kondensationswärme kann die Warmwasserversorgung ganzer Stadtteile übernehmen.

Bleibt eine Flüssigkeit in einem offenen Gefäß längere Zeit stehen, so „verschwindet" sie. Die Gänsefüßchen deuten schon an, daß in Wirklichkeit etwas anderes vor sich geht: Die Flüssigkeit verwandelt sich ganz allmählich in Dampf, sie „verdunstet". Im Gegensatz zum Kochen erfolgt dabei die Umwandlung in Dampf nur an der Flüssigkeitsoberfläche. Von den in steter Bewegung befindlichen Flüssigkeitsmolekülen haben einzelne so viel „Schwung", daß sie der Flüssigkeit entfliehen können. Je größer die Flüssigkeitsoberfläche ist, desto mehr Moleküle befinden sich in Oberflächennähe, und desto mehr Moleküle haben eine Chance, zu entkommen. Die Folgerung daraus: Soll eine Flüssigkeit schnell verdunsten, so muß man ihre Oberfläche möglichst vergrößern. Deshalb sind zum Beispiel Salzpfannen, in denen Meerwasser verdunsten und Kochsalz zurückbleiben soll, groß, aber flach. Wäsche wird zum Trocknen nicht zusammengeknüllt, sondern möglichst ausgebreitet aufgehängt. Auch spannt man die Leinen nicht zu dicht beieinander, denn die Verdunstung wird beschleunigt, wenn die zu Dampf gewordenen Wasserteilchen durch die vorbeistreichende Luft rasch abgeführt werden. Das ist auch der Grund, weswegen Wäsche bei Windstille langsamer trocknet als bei einer kräftigen Brise.

Umgekehrt ist eine Verkleinerung der Flüssigkeitsoberfläche am Platze, wenn die Verdunstung vermindert werden soll. Die enghalsigen Gefäße, die uns in verschiedenen Ausführungen überall in tropischen Gebieten begegnen, sind eine aus der Erfahrung gewonnene Anwendung dieses Satzes.

Dabei stoßen wir bereits auf ein weiteres verdunstungsförderndes Moment: Eine Flüssigkeit verdunstet um so schneller, je höher ihre Temperatur ist. Daher wünscht sich die Hausfrau Sonnenschein zum Wäschetrocknen, und deshalb brennt unter dem Flüssigkeitsbehälter des Rauchverzehrers eine kleine Glühlampe.

Auch zum Verdunsten ist Wärme notwendig. Sie wird der Flüssigkeit selbst oder ihrer Umgebung entzogen, die sich infolgedessen abkühlt. Beim Verdunsten entweichen die „schnellsten" Moleküle, die langsameren bleiben zurück. Da aber die Temperatur eines Körpers ein Maß für die Geschwindigkeit seiner Moleküle ist, muß das „Verschwinden"

der schnellen Moleküle sich durch eine Temperaturerniedrigung bemerkbar machen.
Beispiele für das Auftreten der „Verdunstungskälte" gibt es in Hülle und Fülle: Stehen uns Schweißtropfen auf der Stirn, so empfinden wir jeden Luftzug als „kühl" – auch wenn es sich um warme Luft handelt. Ähnlich ergeht es uns, wenn wir uns nach dem Duschen nicht sofort abtrocknen; die starke Abkühlung der Haut und des darunterliegenden Gewebes kann dabei sogar zu einer schweren Erkältung führen.
Trinkwassergefäße der libyschen und ägyptischen Oasenbewohner sind mit einer dicken Bastschicht umhüllt. Man feuchtet sie an und stellt das Gefäß ins Freie. Durch die Verdunstung ist das Wasser bereits nach kurzer Zeit erfrischend kühl. Wenn wir im Sommer eine Flasche in einen feuchten Lappen wickeln und vor das Fenster stellen, erzielen wir die gleiche Wirkung.
Butterkühler werden mit Wasser gefüllt. Es dringt durch die porösen Gefäßwandungen und verdunstet an der Außenseite des Gefäßes. Die Butter bleibt frisch und fest.
An sehr heißen Orten ist man bereits dazu übergegangen, Dächer im Sommer ständig mit Wasser zu besprühen. Die dabei erreichte Linderung der Raumtemperatur ist vor allem auf die rasche Verdunstung zurückzuführen.
Stoffe, die rasch verdunsten, können oft eine sehr beträchtliche Abkühlung herbeiführen. Wir merken es bereits, wenn wir uns wenige Tropfen Spiritus oder Benzin auf die Handfläche schütten oder uns mit Kölnisch Wasser einreiben. Spritzt man Chloräthyl auf die Haut, wird diese durch die starke Abkühlung schmerzunempfindlich. Das „Vereisen" des Gewebes vor kleinen chirurgischen Eingriffen beruht darauf.

Was Wärme wert ist

„Mit geschickten Fingern quirlte ‚Scharfes Auge' den Holzstab in der Vertiefung eines Rindenstückes, um die er fürsorglich trockenes Moos gehäufelt hatte. Rauch kräuselte empor, ein Flämmchen sprang auf und wurde knisternd größer. Noch ehe der Mond auf seiner Bahn eine Spanne weitergezogen war, strich der appetitliche Duft einer bratenden Hirschlende durch den nächtlichen Cañon . . ."
Wahrscheinlich hat der Autor des Indianerschmökers weniger Zeit für diesen Absatz gebraucht als „Scharfes Auge" zum

Feueranmachen; denn so einfach ist das „Feuerbohren" gar nicht. Probieren Sie es nur einmal selbst aus! Ihre Hochachtung vor Streichholz und Feuerzeug wird mit jedem Schweißtropfen wachsen. Trotzdem waren bis in die jüngste Zeit das Feuerbohren und das Feuerreiben für viele Völker die einzige Möglichkeit, künstlich eine Flamme zu entfachen.

Daß Reibung Wärme erzeugt, ist vielleicht eine der bekanntesten physikalischen Erfahrungen: Ein Streichholz entzündet sich durch Reibungswärme; eine Welle läuft sich heiß, wenn wegen ungenügender Schmierung die Reibung überhandnimmt; Bohrer, Drehstähle, Fräser müssen ständig gekühlt werden.

Gerade die Beobachtung, daß Reibung stets Wärme hervorruft, hat aber auch der Annahme den Todesstoß versetzt, die Wärme sei ein besonderer „Stoff". Daß beispielsweise beim Bohren Wärme entsteht, ließ sich, wenn auch mit einigen Schwierigkeiten, noch begründen. Wie aber sollte man erklären, daß durch stunden- oder tagelanges Bohren oder Reiben jede beliebige Wärmemenge gewonnen werden konnte? Hier versagt die Annahme eines Wärmestoffes.

Wo blieb außerdem die beim Reiben oder Bohren aufgewandte Arbeit? Verschwand sie? Das hätte im Widerspruch zu allen Erfahrungen gestanden; denn stets hatte man erfahren, daß Arbeit sich lediglich verwandelt, nicht aber völlig verlorengeht. Arbeit „verschwand" – Wärme „entstand"; war Wärme vielleicht nichts anderes als eine besondere Art von Arbeit oder Energie? Zeigte sich hier eine Verknüpfung von Mechanik und Wärmelehre, von zwei Gebieten der Physik, die sich scheinbar gar nichts angingen?

Wir wissen heute, daß es diesen Zusammenhang gibt und daß die beim Reiben aufgewandte Arbeit sich in der größeren Bewegungsenergie der Moleküle der erwärmten Körper wiederfindet. Doch vor 150 Jahren stand man solchen Gedanken eines umfassenden Zusammenhanges noch recht skeptisch gegenüber, und es änderte auch nicht viel, daß selbst Wissenschaftler wie Leonhard Euler (1707 bis 1783) oder Michail Lomonossow (1711 bis 1765) sie ausgesprochen hatten.

Den Heilbronner Arzt Julius Robert Mayer (1814 bis 1878) ließen diese Fragen nicht mehr los, seit er als Schiffsarzt physiologischen Erscheinungen begegnet war, die solche Zusammenhänge nahelegten. Doch Mayers Überlegungen gingen noch weiter: „Wenn", so sagte er sich, „Wärme und Arbeit wesensgleich sind, so muß gleicher Arbeitsaufwand stets die

gleiche Wärmemenge erzeugen, und das gleiche Quantum Wärme müßte immer die gleiche mechanische Arbeit liefern können, beispielsweise in einer Dampfmaschine. Mehr noch: Es müßte sich ein zahlenmäßiger Ausdruck finden lassen, mit dessen Hilfe man die Verwandlung von Wärme in Arbeit und von Arbeit in Wärme berechnen könnte."

Nach seiner Rückkehr in die Heimat wandte sich Mayer mit Feuereifer seinen neuen Ideen zu. Er erarbeitete sich zunächst das notwendige physikalische und mathematische Rüstzeug, das er als Arzt nicht besaß, und begann dann, seinen Gedanken festere Form zu geben und sie schriftlich niederzulegen. Am Ende seiner Untersuchungen war es gewiß: Wärme und Arbeit lassen sich ineinander umwandeln; und diese Umwandlung vollzieht sich stets im gleichen Zahlenverhältnis, das durch das „mechanische Wärmeäquivalent" bestimmt ist. Weder Wärme noch mechanische Arbeit gehen dabei verloren. Energie kann weder erzeugt noch „vernichtet" werden – dieser Satz, der sich in der Mechanik immer wieder bestätigt hatte, galt auch für die Beziehungen zwischen Wärmelehre und Mechanik. Physikalische Disziplinen führen kein voneinander isoliertes Dasein, sondern stehen in enger Wechselwirkung, sind Teile des großen Zusammenhanges der materiellen Welt. „Die Einheit aller Bewegung in der Natur", so würdigt Friedrich Engels Mayers Arbeiten, „ist nicht mehr eine philosophische Behauptung, sondern eine naturwissenschaftliche Tatsache."

Doch Anerkennung fand Mayer, der seinen Ideen Beruf und Familienglück geopfert hatte, zunächst nicht. Im Gegenteil: Fachgelehrte überschütteten ihn mit Hohn oder übergingen die Darlegungen des „physikalischen Außenseiters" mit einem mitleidigen Lächeln. Im Grunde hielt man Mayer für das, als was die „Augsburger Allgemeine Zeitung" ihn bezeichnet hatte: für einen blutigen Dilettanten, der besser daran täte, sich um seine Patienten und vielleicht um den Hofratstitel zu bemühen.

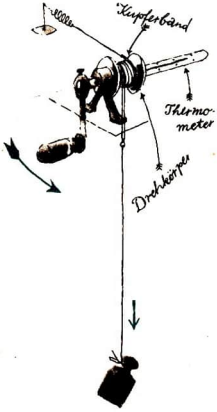
Niemand konnte freilich verhindern, daß im Zeitalter der Dampfmaschine und der Eisenbahn die Beziehungen zwischen Wärme und Arbeit auch zahlreiche andere Physiker interessierten. Joule (1818 bis 1889), Colding (1815 bis 1888) und Helmholtz (1821 bis 1894) gingen ähnlichen Gedanken nach wie Mayer und gelangten zu gleichen Resultaten. Erst als sie ihre Ergebnisse veröffentlicht hatten, erinnerte man sich des Heilbronner Arztes, besonders, nachdem der englische Gelehrte John Tyndall (1820 bis 1893) nachdrücklich

auf Mayers Verdienste hingewiesen hatte. So fand Julius Robert Mayer nach harten Kämpfen, in deren Verlauf man ihn sogar in eine Nervenheilanstalt eingewiesen hatte, doch noch die Anerkennung, die er sich durch sein Jahrzehnte währendes Ringen verdient hatte. Aber selbst als der Name Mayer in aller Welt mit Achtung genannt wurde, fanden sich noch Schreiberlinge, die sich dagegen verwahrten, daß man einem „Irren" auf wissenschaftlichen Kongressen das Wort erteile.

Das mechanische Wärmeäquivalent läßt sich in einer halben Zeile niederschreiben: 1 kcal entspricht 427 kpm.

Das heißt: 427 kpm an mechanischer Arbeit sind notwendig, um eine Kilokalorie zu gewinnen; umgekehrt ließen sich aus einer Kilokalorie auf keinen Fall mehr als 427 kpm an mechanischer Arbeit „herausholen"; in Wirklichkeit ist nur eine teilweise Rückverwandlung von Wärme in Arbeit möglich.

Ehe wir auf die Bedeutung des Wärmeäquivalents eingehen, sei gesagt, daß man es auf vielerlei Weise bestimmen kann. Meist läßt man mechanische Arbeit durch Reibung „aufzehren" und bestimmt die dabei frei werdende Wärmemenge.



Das Bild zeigt ein Modell einer solchen Meßanordnung: Um einen metallischen Drehkörper ist in mehreren Windungen ein Kupferband geschlungen, das durch ein Gewicht straffgehalten wird. Beim Drehen der Handkurbel muß Arbeit gegen die auftretende Reibung geleistet werden. Der Drehkörper erwärmt sich. Auf diese Weise läßt sich das Wärmeäquivalent errechnen.

Was sagt uns das mechanische Wärmeäquivalent? Wo hilft es uns? Zunächst ist festzustellen, daß der „Umrechnungskurs" zwischen der Wärmeeinheit und der mechanischen Arbeit sehr hoch ist: 1 kcal, mit der wir einen Liter Wasser um nur 1 Grad erwärmen könnten, würde, in mechanische Arbeit verwandelt, ausreichen, um 50 kg mehr als 8 m hoch zu heben!

Das Teeglas auf Ihrem Frühstückstisch enthält etwa 200 p Tee von 80 °C. Kühlt er sich ab, etwa bis auf 20 °C, so gibt er ebensoviel Wärmeenergie an die Zimmerluft ab, wie notwendig war, um ihn von 20 bis auf 80 °C zu erwärmen. Das sind 200 · 60, also 12 000 cal oder 12 kcal. Die äquivalente mechanische Arbeit von 5124 kpm vollbringt ein 75 kp schwerer Mensch, der auf einen 68 m hohen Turm steigt. Er könnte mit gleichem Arbeitsaufwand auch einen 50-kp-Sack 41 m hoch, das heißt bis ins 8. Stockwerk, tragen. Hätten Sie dem Glas Tee ein solches Arbeitsvermögen zugetraut?

Dauert das Abkühlen eine Viertelstunde, so beträgt die „Leistung" des Glases Tee, wie Sie leicht nachrechnen können (vgl. S. 81), immerhin ungefähr $^1/_{13}$ PS.
Dieses Beispiel ist zwar eine interessante, aber doch nicht gerade allzu wichtige Zahlenspielerei – niemand wird auf den Gedanken verfallen, eine Tasse Tee „arbeiten" zu lassen. Unentbehrlich als eine Berechnungsgrundlage dagegen ist das mechanische Wärmeäquivalent immer dann für die Technik, wenn Wärme in mechanische Arbeit oder mechanische Arbeit in Wärme verwandelt wird. Solche Umwandlungen vollziehen sich in jeder Dampfmaschine und in sämtlichen Verbrennungsmotoren. Vor der Entdeckung des Wärmeäquivalents tappte man zum Beispiel, was die Leistung einer Dampfmaschine anbelangte, ziemlich im dunkeln. Was könnte eine Maschine leisten, unter deren Kessel Stunde um Stunde 100 kg Kohlen verbrannt werden? Wie muß eine Dampfmaschine konstruiert werden, damit sie zum Antrieb einer Pumpe weder zu schwach noch unnötig kräftig und daher in der Anschaffung und im Betrieb zu teuer ist? Wie muß eine Lokomotive beschaffen sein, die zwanzig vollbeladene Wagen eine bestimmte Steigung emporzieht? Solche und ähnliche Fragen waren für die Produktionstechnik und für das Verkehrswesen von entscheidender Bedeutung. Das mechanische Wärmeäquivalent trug wesentlich dazu bei, sie exakt zu beantworten.
Und jetzt müssen wir einmal vorgreifen: Zu Mayers Lebzeiten begann auch eine andere physikalische Disziplin, sich in der Technik zu bewähren: Die Elektrotechnik entstand. Sehr bald merkte man, daß Elektroenergie sich gleichfalls in Wärme umwandeln läßt und daß enge Beziehungen zwischen den mechanischen Kräften, dem Magnetismus und der Elektrizität bestehen. Gab es auch dafür „Äquivalente"? Man suchte – und man fand: Auch Elektroenergie verwandelt sich nach stets gleichbleibendem Zahlenverhältnis in mechanische oder in Wärmeenergie, und stets ist dieselbe Menge an mechanischer Arbeit nötig, um ein bestimmtes Quantum an Elektroenergie zu gewinnen. Sehr bald konnte man eine Umrechnungstabelle aufstellen, die, in heutigen Einheiten geschrieben, so aussieht:

	kpm	kcal	kWh
kpm	1	0,00234	$2{,}724 \cdot 10^{-6}$
kcal	427	1	0,00116
kWh	367 089	860	1

Mit Energieumwandlungen zwischen den verschiedenen Energieformen bekommt es der Techniker immer wieder zu tun: Der Elektromotor setzt elektrische in mechanische Energie um, und die Generatoren im Kraftwerk erfüllen die umgekehrte Aufgabe: Sie gewinnen aus der Bewegungsenergie des strömenden Wassers oder Dampfes Elektroenergie, die dann vielleicht von elektrischen Heizgeräten in Wärmeenergie verwandelt wird.
Betrachten wir ein Beispiel: Sollen 500 l Wasser um 10 °C erwärmt werden, so sind dazu 5000 kcal erforderlich. Bei elektrischer Heizung wären, da aus einer Kilowattstunde 860 kcal zu gewinnen sind, 5,8 kWh aufzuwenden (wobei allerdings angenommen wird, daß keine Wärmeverluste auftreten). Die 5,8 kWh entsprächen einer mechanischen Arbeit von etwa 2 130 000 kpm. 100 Menschen mit einem Durchschnittsgewicht von 70 kp könnten mit diesem Arbeitsaufwand etwa 300 m hoch gehoben werden. Wenn wir bedenken, was wir für diese 5,8 kWh zu zahlen haben, wird uns schlagartig klar, welche gewaltigen Energiemengen uns durch die Elektrifizierung für einen geradezu lächerlich niedrigen Preis zur Verfügung gestellt werden.
Daß Energieumwandlungen tatsächlich nach den in der Tabelle zum Ausdruck kommenden Gesetzmäßigkeiten verlaufen, hat sich millionenfach bestätigt. Damit wird unsere Übersicht Ausdruck eines viel umfassenderen Naturgesetzes, des „Satzes von der Erhaltung der Energie":

Energie kann zwar ihre Erscheinungsform wechseln, sie kann aber weder erzeugt werden noch verlorengehen. Bei Naturvorgängen treten immer nur Energieumwandlungen auf.

Alle Energie, die für uns „arbeitet", entstammt dem großen Energiereservoir des Weltalls. Sämtliche Generatoren und Motoren haben nur die Aufgabe, Energie in eine für unsere Zwecke geeignete Form zu bringen, sind aber keine „Energieerzeuger".
Es ist mit der Energie ähnlich wie mit dem Wasserkreislauf auf der Erde: Ob uns das Wasser als Eis oder Schnee, als Bach oder Strom, als Graupelschauer oder Dampf entgegentritt, es ist letzten Endes immer wieder das gleiche Wasser, dessen Gesamtmenge auf der Erde trotz aller Umformungen und Verwandlungen im wesentlichen unverändert bleibt.
So ist der Satz von der Erhaltung der Energie, der bereits

von Mayer erkannt und später von Hermann Helmholtz klar ausgesprochen wurde, eines der wichtigsten und allgemeinsten Naturgesetze. Alles, was geschieht, sei es das Fallen eines Wassertropfens, der Zusammenstoß zweier Sternsysteme oder die Stoffwechselvorgänge der Lebewesen, ist diesem Naturgesetz unterworfen.
Nicht zuletzt aber zog der Satz von der Erhaltung der Energie einen dicken Schlußstrich unter das jahrhundertelange Bemühen um ein „Perpetuum mobile", um eine Maschine, die aus dem Nichts Arbeit erzeugt. Eine solche Maschine kann es nicht geben; denn sie widerspräche dem Energiesatz. An Versuchen ihrer Konstruktion hat es freilich nicht gefehlt, und selbst heute taucht hier und da noch ein „Erfinder" auf, dessen „Genialität" sich über alle Naturgesetze kühn hinwegsetzt. Physiker, Akademien und wissenschaftliche Verlage können ein Lied von den Perpetuum-mobile-Konstrukteuren singen . . .

„Perpetuum mobile"

Zwischen Kohlenkeller und Ascheneimer

Die Liste der Brennstoffe ist lang. Sie reicht vom Flugzeugbenzin bis zum getrockneten Kameldung, vom Hüttenkoks und vom Anthrazit bis zum Torf und zur Rohbraunkohle. Doch so verschieden diese Stoffe auch sein mögen: Wenn sie verbrennen, geschieht im wesentlichen immer das gleiche. Sie verbinden sich chemisch mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft und geben dabei Wärmeenergie ab.
Da wir inzwischen den Satz von der Erhaltung der Energie kennengelernt haben, fragen wir sofort: Wo stammt die beim Verbrennen freiwerdende Energie her? Sie ist letzten Endes nichts anderes als umgewandelte Sonnenenergie. Als die Brennstoffe entstanden, wurde sie gewissermaßen „chemisch konserviert" und kommt nunmehr wieder zum Vorschein.
Koks „gibt mehr Hitze" als Rohbraunkohle, Braunkohlenbriketts „heizen besser" als Holz. Soweit die Erfahrung und die Ausdrucksweise des Alltags. Doch wir müssen uns hier genauer ausdrücken: Wenn wir behaupten, daß Koks mehr Hitze abgibt als ein anderer Brennstoff, meinen wir in Wirklichkeit, daß ein *bestimmtes Quantum* Koks mehr Wärme liefert als ein *gleiches Quantum* des Vergleichsbrennstoffs.
Die in einem Brennstoff enthaltene Wärmeenergie charakterisiert man durch seinen „Heizwert". Man versteht darunter

die Wärmemenge, die ein Kilogramm des betreffenden Brennstoffs bei vollständiger Verbrennung abgibt. Der Heizwert wird daher in „kcal/kg" (oder auch in cal/g) angegeben.
Daneben verwendet man sehr oft die Bezeichnung „Verbrennungswärme"; und beide Ausdrücke werden häufig als gleichbedeutend betrachtet. Das ist nicht richtig, denn es gibt einen wichtigen Unterschied zwischen dem Heizwert und der Verbrennungswärme:
Die meisten Brennstoffe enthalten Wasser, das beim Verbrennen in Dampf verwandelt wird. In diesem Wasserdampf ist (vgl. S. 139) ein nicht unerheblicher Energiebetrag als Verdampfungswärme gespeichert. Werden die Verbrennungsgase, denen der Dampf beigesellt ist, so weit abgekühlt, daß der Dampf kondensiert, so wird seine Verdampfungswärme als Kondensationswärme zurückgewonnen und erhöht die aus dem Brennstoff zu entnehmende Wärmemenge. In diesem Fall sprechen wir von „Verbrennungswärme".
Meistens allerdings geht die Kondensationswärme des Wasserdampfes verloren, da die Verbrennungsgase sich „zu spät", das heißt erst nach dem Verlassen des Feuerungsraumes bis unter 100 °C abkühlen. Die ohne die Kondensationswärme zur Verfügung stehende Wärmemenge ist der „Heizwert". Der Heizwert eines wasserhaltigen Brennstoffes ist also stets etwas geringer als seine Verbrennungswärme.

Heizwerte wichtiger Brennstoffe (kcal/kg)

Holz (lufttrocken)		3 500
Torf		3 300
Rohbraunkohle	um	2 800
Braunkohlenbriketts	bis	5 000
Steinkohle	um	7 500
Motorenbenzin	um	10 000
Dieselöl	bis	10 000
Stadtgas (kcal/Nm^3)		4 100

Die Tabelle bestätigt Ihre Erfahrung, daß die Größe Ihres winterlichen Kohlenvorrats davon abhängt, *was* Sie bestellen: Verfeuern Sie Rohbraunkohle, so ist die notwendige Menge weit größer, als wenn Sie sich für Braunkohlenbriketts oder für Steinkohle entschließen.
Wichtiger allerdings sind die Auswahl eines geeigneten Brennstoffs und die Kenntnis seines Heizwertes für die Technik.

Denken wir etwa an die Konstruktion einer Lokomotive. Wieviel Kalorien in ihr je Minute oder Stunde gewonnen werden müssen, damit sie eine bestimmte Zugleistung aufweist, läßt sich mit Hilfe des Wärmeäquivalents und anderer Beziehungen ausrechnen. Doch es kommt auch darauf an, *wie* diese Kalorien gewonnen werden. Stehen Brennstoffe hohen Heizwertes zur Verfügung, so wird die Lokomotive mit einem relativ geringen Brennstoffvorrat weite Strecken zurücklegen können. Ist die Maschine jedoch auf Brennstoffe niedrigen Heizwertes angewiesen, so sinkt ihr Aktionsradius. Hier geht die Bedeutung des Heizwertes über das rein Technische hinaus: Er entscheidet über die Anlage von Kohlevorräten längs der Strecke und den Transport der Kohle bis zu den Lagerplätzen. Er wirkt sich auf die Zeitspannen zwischen ergänzenden Kohleübernahmen aus und beeinflußt die Zahl der notwendigen Lokomotiven und sogar den Fahrplan.

Beim Bau eines Wärmekraftwerkes oder eines Fernheizwerkes muß man ähnliche Überlegungen und Berechnungen anstellen. Oft ist dabei der Heizwert des Brennstoffs mitbestimmend für den Standort der Werke: Sind nur Brennstoffe niederen Heizwertes vorhanden, so müssen die Kraftwerke möglichst nahe bei den Brennstoffvorkommen errichtet werden. Die hohen Transportkosten für große Brennstoffmengen würden sonst einen wirtschaftlichen Betrieb ausschließen. Dies ist der Grund dafür, daß die meisten Großkraftwerke unserer Republik im Braunkohlegebiet liegen.

Brennstoffe hohen Heizwertes dagegen können schon eher auf dem Land- oder billiger auf dem Wasserwege über größere Entfernungen transportiert werden. Deswegen verbrennen Kraftwerke, die sich aus irgendwelchen Gründen nicht „nahe beim Brennstoff" errichten lassen, Steinkohle oder Öl.

Die flüssigen Brennstoffe sind, was ihren Heizwert anbelangt, den festen weit überlegen. Die in 20 l Benzin enthaltene Wärmemenge entspricht dem Heizwert von beinahe 75 kg Rohbraunkohle oder von 40 kg Briketts. Wäre es nicht so, hätte der motorisierte Straßenverkehr wahrscheinlich nicht seine heutige Verbreitung gefunden; denn bereits nach kurzer Wegstrecke müßten die Fahrzeuge nachtanken.

Der Heizwert wird nur bei vollständiger Verbrennung ausgenutzt. Dazu muß eine ausreichende Menge Verbrennungsluft zugeführt werden, die an alle Brennstoffteilchen herankommt. Wenn man den Heizwert eines Stoffes feststellen will, ist diese Bedingung leicht zu erfüllen; denn man verbrennt eine kleine Stoffprobe in reinem Sauerstoff und mißt

die entstehende Wärme. In der Praxis jedoch ist eine vollständige Verbrennung kaum zu erreichen, weil die Luft nicht völlig „frei" um den Brennstoff streichen kann. Seine Teile liegen aufeinander, und der Luftzutritt wird durch Asche behindert. In vielen Feuerungen – vor allem in Zimmeröfen – werden daher Brennstoffe nur unvollständig ausgenutzt.
Die Wirksamkeit des Verbrennungsvorganges läßt sich steigern, wenn man den Brennstoff in möglichst feiner Verteilung in den Feuerungsraum bläst oder spritzt. Deshalb wird in modernen Kraftwerken und anderen Kesselanlagen keine Stückkohle, sondern Kohlenstaub verbrannt. Seine Teilchen werden eingeblasen, kommen in innige Berührung mit der Verbrennungsluft, verglühen noch in der Schwebe und geben dabei fast ihre gesamte Wärme ab.

Püsterich und seine Enkel

„... und diese Metallfigur ist der berühmte Püsterich. Bereits seit 400 Jahren zählt er zu den Sehenswürdigkeiten des Schlosses. Die fast einen halben Meter hohe Figur ist hohl. Durch zwei Öffnungen – diese hier am Mund und jene auf dem Kopf – wurde Wasser eingefüllt. Man verkeilte die Löcher mit Pfropfen und stellte den Püsterich in das Kaminfeuer. Das Wasser begann zu kochen, und es entwickelte sich Dampf, der die Pfropfen mit einem Knall heraustrieb. Der ausströmende Wasserdampf verursachte, wie Chronisten melden, ein ‚entsetzliches Geräusch'. Es soll sogar einmal ein Schloß durch einen Püsterich in Brand geraten sein; wahrscheinlich schleuderte der Dampf das Feuer auseinander, und die abergläubischen Anwesenden suchten schleunigst das Weite, statt die Flammen zu ersticken."
Soweit die Schilderung, die man uns im Sondershausener Schloß vom Püsterich, einem „Großvater" der Dampfmaschine, gab. Aber bereits lange vor seiner Zeit hatte man versucht, die Kraft des Dampfes anzuwenden.
Archimedes soll daran gedacht haben, ein „dampfbetriebenes" Geschütz zu konstruieren, und Heron von Alexandria (um 100 v. u. Z.) baute sogar eine Art einfachster Dampfturbine. Den Versuch, sie zur Antriebsmaschine weiterzuentwickeln, unternahm niemand. Sklaven waren billiger und einfacher zu „bedienen"...
1663 berichtet der Engländer Somerset, er habe das Rohr

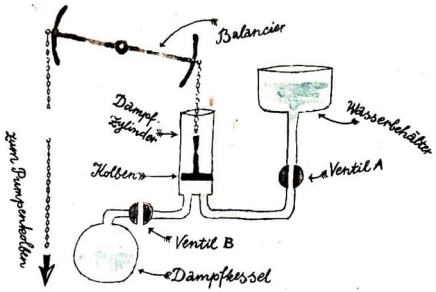
einer ausgedienten Kanone zu $^3/_4$ mit Wasser gefüllt, sämtliche Öffnungen fest verschlossen und ein Feuer darunter entfacht. Nach 24 Stunden ununterbrochenen Nachlegens sei die Kanone mit einem gewaltigen Knall in Stücke zersprungen. Eine physikalische Spielerei? Eine „Neuauflage" des Püsterich? Es war mehr; denn Somerset sah sein Experiment als Vorversuch für eine Wasserhebemaschine mit Dampfantrieb an. Mit ihrer Hilfe wollte er Bergwerke entwässern.

Die Beseitigung des in Schächte und Stollen eindringenden Wassers war damals ein vordringliches technisches Problem. Häufig mußten, besonders in England, Bergwerke stillgelegt werden, weil man des Wassers nicht Herr zu werden vermochte. Die Entwässerung der Gruben durch Pumpen, die von Tieren oder von Wasserrädern angetrieben wurden, war kompliziert und befriedigte nicht. Man brauchte eine neue, leistungsfähigere Kraftquelle, wenn man den steigenden Bedarf an Erz und Kohle decken wollte. Da man inzwischen die Kraft des Dampfes und des Luftdrucks kennengelernt hatte, lag es nahe, sie nicht nur zu physikalischen Spielereien, sondern auch zu nützlicher Arbeit heranzuziehen.

Wird Wasser zu Dampf, so beansprucht es einen weit größeren Raum. 1 l Wasser verwandelt sich in ungefähr 1700 l Dampf von Atmosphärendruck. Unterbindet man die Ausdehnung des Dampfes, so steigt sein Druck; der Dampf kann „arbeiten": Er trieb die Pfropfen des Püsterichs heraus und zersprengte die Kanone Somersets. Steigt in einem Kessel der Dampfdruck zu sehr an, so könnte es zur Kesselexplosion kommen. Deshalb sind alle Kessel mit Sicherheitsventilen ausgestattet, die den Dampf abblasen, sobald sein Druck den zulässigen Höchstwert überschreitet. Kesselexplosionen winzigen Ausmaßes können wir im Winter täglich hören: Das „Knacken" brennenden Holzes rührt daher, daß das im Holz eingeschlossene Wasser verdampft und die Fasern sprengt.

Die ersten einsatzfähigen Dampfmaschinen wurden vor etwa 250 Jahren gebaut. Allerdings waren es noch keine „echten" Dampfmaschinen, sondern „atmosphärische" Maschinen, in denen der Luftdruck die eigentliche Arbeit verrichtete, während der Dampf nur Hilfestellung gab.

Die Skizze auf S. 154 zeigt die Arbeitsweise der atmosphärischen Dampfmaschine von Thomas Newcomen (1663 bis 1729). Sie wurde noch 100 Jahre nach ihrer Erfindung in Kohlengruben eingesetzt. Ihre wichtigsten Teile sind ein Dampfkessel und ein Dampfzylinder, in dem ein Kolben leicht, aber gegenüber der Wandung dampf- und luftdicht auf- und



abgleiten kann. Solange die Ventile A und B geschlossen sind, verhindert der äußere Luftdruck, daß Pumpenkolben und Gegengewicht den Kolben im Dampfzylinder in die Höhe ziehen; denn unter dem Kolben würde dabei ein luftleerer Raum entstehen.

Hat sich im Kessel Dampf entwickelt, wird das Ventil B geöffnet. Das Gegengewicht zieht nunmehr den Kolben hoch; denn es strömt Dampf in den Raum unter dem Kolben, und der Luftdruck kann diesen nicht mehr niederhalten.

Sobald der Kolben am oberen Ende des Dampfzylinders angelangt ist, wird das Ventil B geschlossen; die Dampfzufuhr hört auf. Jetzt öffnet man das Ventil A, und aus einem Vorratsbehälter spritzt kaltes Wasser in den Zylinder. Der Dampf verwandelt sich in Wasser zurück. Dabei entsteht unter dem Kolben ein luftverdünnter Raum. Der Luftdruck schiebt infolgedessen den Kolben nach unten und hebt gleichzeitig Gegengewicht und Pumpenkolben. Diese Rückbewegung ist der „Arbeitshub" der Maschine. Sobald der Kolben seine Ausgangsstellung erreicht hat, wiederholt sich das Spiel durch entsprechendes Betätigen der Ventile.

Es ist leicht einzusehen, daß eine derartige Maschine sehr langsam und unregelmäßig arbeitete; denn ihr Arbeitsrhythmus hängt vom Auf- und Zudrehen der Ventile ab. Außerdem treten große Wärmeverluste auf, weil der Dampfzylinder abwechselnd abgekühlt und durch den erneut einströmenden Dampf erst wieder erwärmt werden muß.

Die Ventile wurden anfänglich von Hand bedient – eine Arbeit, die Kinder verrichten mußten. Ein aufgeweckter Junge, Humphrey Potter, war es dann auch, der auf seine Weise gegen diese stumpfsinnige Beschäftigung aufbegehrte. Er hatte

beobachtet, daß die Ventile im gleichen Takt geöffnet und geschlossen werden mußten, in dem der Balancierhebel auf- und abschwang. Sollte es da nicht möglich sein, Balancier- und Ventilgriffe so miteinander zu verbinden, daß die Ventile selbsttätig im richtigen Augenblick geöffnet und geschlossen wurden? Potter probierte es mit provisorischen Schnurzügen aus. Die Einrichtung funktionierte. Sein „Boß" erkannte rasch, daß man auf diese Weise eine – wenn auch erbärmlich bezahlte – Arbeitskraft einsparen konnte und ersetzte die Schnuren durch ein Gestänge.

Auch der Anwendungsbereich der so verbesserten Newcomenschen Maschine blieb fast ausschließlich auf den Pumpenantrieb beschränkt. Dort wirkten sich die hin- und hergehende Kolbenbewegung und die Pausen zwischen den Arbeitshüben nicht allzu störend aus. Als Antriebsmotor für Werkzeugmaschinen oder für Fahrzeuge war die Maschine Newcomens nach wie vor ungeeignet; denn eine solche Maschine mußte ihre Kraft gleichmäßig abgeben und Drehbewegungen hervorrufen können.

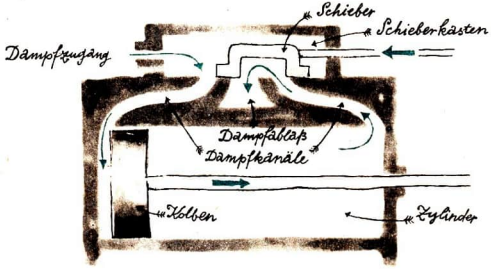
Der russische Erfinder Iwan Iwanowitsch Polsunow (1728 bis 1766) näherte sich diesem Ziel durch wesentliche Verbesserungen der atmosphärischen Dampfmaschine. So erreichte er einen gleichmäßigeren Gang, indem er zwei Kolben eine gemeinsame Welle bewegen ließ. Während der eine Dampfkolben im Leerlauf hochging, senkte sich der andere im Arbeitshub. Das Prinzip, mehrere Kolben auf *eine* Welle wirken zu lassen, begegnet uns auch heute überall, wo Kolbenmaschinen, um gleichmäßigen Lauf und höhere Leistung zu erzielen, als Mehrzylindermotoren ausgeführt werden.

Polsunows Dampfmaschine trieb die Blasebälge eines Hüttenwerkes an und leistete, was ihr Erfinder im voraus errechnet hatte. Nach Polsunows Tode jedoch ließ man es bald an der notwendigen Wartung fehlen; schließlich wurde die Maschine wieder stillgesetzt und geriet fast völlig in Vergessenheit.

Die „echte" Dampfmaschine, bei der nicht mehr der Luftdruck, sondern die Kraft des Dampfes die Arbeit leistet, geht vor allem auf Arbeiten des Engländers James Watt (1736 bis 1819) zurück.

Watt setzte die Wärmeverluste herab, indem er den Dampf nicht mehr im Zylinder, sondern in einem davon getrennten Gefäß in Wasser rückverwandelte. Dadurch wurde es möglich, den Zylinder ständig auf der Temperatur des Dampfes zu halten. Der wichtigste Fortschritt aber war, daß Watt den

Zylinder gegen die Außenluft abschloß und den Dampf abwechselnd auf die Vorder- und auf die Hinterseite des Kolbens wirken ließ. Er erfand die dazu notwendige selbsttätige Steuerung der Dampfmaschine, löste das Problem der Umwandlung der hin- und hergehenden Bewegung in eine Drehbewegung und ersann zahlreiche weitere Verbesserungen der Dampfmaschine. Wie sorgfältig und überlegt Watt arbeitete, geht schon daraus hervor, daß die Dampfmaschine sich seitdem in ihrem grundsätzlichen Aufbau nicht wesentlich verändert hat. Führte man Watt eine moderne Dampflokomotive vor, so würde er „seine" Maschine sofort wiedererkennen.



Die Abbildung zeigt das Schnittmodell einer einfachen Kolbendampfmaschine mit „Schiebersteuerung". Der bewegliche Kolben, dessen Hin- und Hergehen durch Kurbel und Kreuzkopf in eine Drehbewegung umgeformt wird, ist deutlich zu erkennen. Ein massives Schwungrad sorgt für gleichmäßigen Lauf der Maschine.

Die taktmäßige Steuerung der Dampfzufuhr und Dampfableitung übernimmt der „Schieber". Er wird über eine am Schwungrad angebrachte exzentrische Scheibe und ein Hebelsystem gleichfalls hin- und hergeführt und steuert den Dampfeinlaß und -auslaß.

In der gezeichneten Kolbenstellung strömt Dampf aus dem Schieberkasten durch den linken Kanal in den Zylinder und drückt den Kolben nach rechts. Gleichzeitig aber muß der von der vorhergehenden Umdrehung „hinter" dem Kolben vorhandene Dampf ausgestoßen werden. Auch das ermöglicht – wie eingezeichnet – die Stellung des Schiebers: Der Dampf fließt durch den rechten Kanal, durch die Aussparung

im Schieber und durch den Dampfauslaßkanal in den Kondensator, wo er in Wasser zurückverwandelt wird.
Bei weiterer Drehung des Schwungrades erreicht der Kolben seine rechte Endstellung. Der Schieber aber geht währenddessen nach links. Es kann nunmehr über den rechten Kanal Dampf hinter den Kolben strömen und ihn nach links drükken. Der Dampf an der linken Kolbenseite verläßt durch den linken Kanal, die Schieberaussparung und den Dampfauslaßkanal den Zylinder. Dieses Wechselspiel wiederholt sich fortwährend. In neueren Dampfmaschinen wird die Schiebersteuerung häufig auch durch Ventile ersetzt, die in entsprechendem Rhythmus geöffnet und geschlossen werden.
Im Kondensator wird, wie bereits erwähnt, aus dem Dampf wieder Wasser, das unter gewissen Voraussetzungen erneut als Speisewasser in den Kessel gepumpt werden kann. Viel wichtiger jedoch ist, daß durch das rasche Kondensieren im Raum hinter dem Kolben ein Unterdruck gegenüber der Außenluft entsteht. Der Dampf, der den Kolben vorantreibt, muß ja nicht nur die Maschine zur Arbeit zwingen, sondern auch den noch hinter dem Kolben vorhandenen Druck überwinden, der die Kolbenbewegung zu hemmen sucht. Je geringer daher dieser Gegendruck ist, desto wirkungsvoller arbeitet die Maschine.
Der Kondensator ist ein kesselähnlicher Behälter, in den der Dampf einströmt. Das Innere des Behälters wird von zahlreichen Röhren durchzogen, durch die Kühlwasser fließt. Es wird durch die Kondensationswärme des Dampfes erhitzt und muß daher fortwährend erneuert werden. Pumpen sorgen für einen ständigen Wasserkreislauf. Der Kühlwasserbedarf einer solchen „Kondensationsdampfmaschine" ist groß. Sie ist deshalb vor allem für ortsfesten Betrieb und für Anlagen geeignet, wo die Kühlwasserversorgung keine Schwierigkeiten bereitet.
Fast alle Dampflokomotiven und auch viele ortsfeste Dampfmaschinen arbeiten im „Auspuffbetrieb". Sie verzichten auf den Kondensator und lassen den Dampf einfach in die Luft strömen. Das hat selbstverständlich einen Nachteil: „Hinter" dem Kolben herrscht jetzt stets normaler Luftdruck, denn der Raum hinter dem Kolben steht mit der Außenluft in Verbindung. Diesen Gegendruck muß der Kolben überwinden. Man gleicht diesen Mangel durch höheren Dampfdruck aus. Drücke von 50 at und darüber sind beim Betrieb von Dampfmaschinen keine Seltenheit.
Es gibt noch weitere Möglichkeiten, die Leistungsfähigkeit

und Wirtschaftlichkeit der Dampfmaschine zu verbessern: Bei den ersten Dampfmaschinen strömte so lange Dampf in den Zylinder, bis der Kolben seinen ganzen Weg zurückgelegt hatte. Der Dampfverbrauch war infolgedessen sehr groß. Man kommt aber auch anders zum Ziel: Man sperrt die Dampfzufuhr zum Zylinder bereits ab, wenn der Kolben etwa den vierten Teil seines Weges zurückgelegt hat. Der Kolben wird dann lediglich durch den sich ausdehnenden Dampf weitergetrieben. Die Leistung einer solchen „Expansionsmaschine" ist zwar etwas geringer als die einer Dampfmaschine mit „Volldampfbetrieb", doch wird diese Differenz durch den sparsameren Dampf- und Brennstoffverbrauch mehr als aufgewogen.

Am besten ließe sich der Dampf ausnutzen, wenn er sich bis auf Atmosphärendruck entspannen und ausdehnen könnte. Das ist jedoch aus technischen Gründen nicht möglich: Die Zylinder würden sehr lang; die Umwandlung des großen Kolbenhubs in eine Drehbewegung wäre schwierig.

Man geht daher anders vor: Man läßt den Dampf sich im sogenannten „Hochdruckzylinder" nur teilweise entspannen und leitet ihn dann einem zweiten Zylinder, dem „Niederdruckzylinder", zu; dort entspannt er sich weiter und leistet erneut Arbeit. Beide Zylinder werden hintereinander oder nebeneinander angeordnet und treiben eine gemeinsame Welle an.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden Dampfmaschinen für Leistungen von 20000 bis 30000 PS gebaut. Es waren Giganten, die eine große Werkhalle ausfüllten. Daneben entwickelte man kleine, schnellaufende „Dampfmotoren"; bei ihnen griff man auf Konstruktionserfahrungen zurück, die man an Verbrennungsmotoren gesammelt hatte.

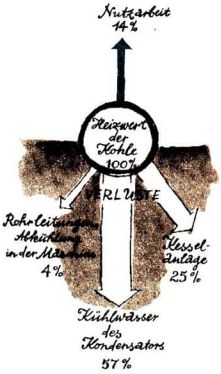
Alle diese Maßnahmen konnten aber einen Hauptmangel der Dampfmaschine nicht beseitigen: Aus physikalischen Ursachen, die wir nicht näher erörtern wollen, läßt sich die im Dampf enthaltene Energie nur unvollständig ausnutzen. Aus diesem Grunde und wegen anderer, unvermeidlicher Verluste bleibt der Wirkungsgrad einer Dampfmaschine trotz aller Bemühungen gering.

In der nächsten Skizze erkennen wir, daß der Wirkungsgrad in einem gegebenen Fall nur 14% erreicht und daß der weitaus größte Teil der erzeugten Wärme im Kondensator „verlorengeht". Allerdings sind die Kondensatorverluste keine Besonderheit der Dampfmaschine; sie treten ebenso in Dampfturbinenanlagen auf. Um wenigstens einen Teil der

Kondensationswärme zu „retten", benutzt man das im Kondensator erwärmte Kühlwasser häufig zum Heizen oder für die Warmwasserversorgung. Viele „Heizkraftwerke", in denen zur besseren Ausnutzung der Brennstoffe elektrischer Strom und Wärme gewonnen werden, beruhen auf diesem Prinzip.

Der schlechte Wirkungsgrad der Dampfmaschine (selbst bei den besten Anlagen beträgt er knapp 20 %, meistens liegt er jedoch unter 10 %) ist einer der Hauptgründe, weswegen die Bedeutung der Dampfmaschine von Jahr zu Jahr zurückgeht. Man kann es sich nicht leisten, Kohle zu fördern und zu transportieren, um sie anschließend in Dampfmaschinen nur zu einem geringen Bruchteil wirklich auszunutzen.

Das gilt vor allem für Dampflokomotiven, in denen nicht einmal die Kondensationswärme des Dampfes ausgenutzt werden kann. Daher gehen immer mehr Staaten dazu über, ihre Bahnstrecken auf elektrischen Betrieb umzustellen oder die Dampflokomotiven durch Dieselloks zu ersetzen. Auch in der Deutschen Demokratischen Republik werden die Dampflokomotiven bald ausgedient haben. Am Ende des Siebenjahrplanes werden über 700 Streckenkilometer elektrifiziert sein; auf anderen Strecken sollen nur noch die wirtschaftlicheren Diesellokomotiven fahren.



Nutzarbeit und Verluste der Kondensationsdampfmaschine

Takte, Kolben und Zylinder

„Sieh mal, ein Pferdewagen, mitten in der Großstadt!" Jedermann bleibt stehen und schaut sich um. Nicht lange mehr, und ein Gespann wird ebensolche Bewunderung und dasselbe Staunen hervorrufen wie vor 70 Jahren ein Kraftfahrzeug. Länger ist es nämlich nicht her, seit die ersten Automobile durch unsere Straßen knatterten . . .

Doch wie hat sich seitdem das Verkehrswesen verändert! Millionen und aber Millionen von Kraftfahrzeugen rollen in allen Teilen der Welt, befahren Straßen, die eigens für den steigenden Kraftverkehr gebaut wurden und meist schon nach wenigen Jahren die ständig wachsende Zahl der Fahrzeuge nicht mehr fassen. Hunderttausende von Kraftfahrzeugen sind in unseren Städten unterwegs; und in allen Ländern machen sich Fachleute Gedanken, durch welche Maßnahmen man auch in Zukunft Sicherheit und Schnelligkeit des Fahrzeugverkehrs wird gewährleisten können.

Neue Industrien, neue Berufe entstanden: Autowerke, Reifenfabriken, Brennstoffraffinerien; Reparaturwerkstätten, Tankstellen, Großgaragen, Fahrschulen und Autofriedhöfe. Kraftfahrzeuge mahlen sich durch glühenden Sand und durch Eiswüsten. Traktoren haben in weiten Teilen der Welt die Zugtiere verdrängt und die Landarbeit leichter und produktiver werden lassen. Die gleiche Energie, die all diese Fahrzeuge vorwärtstreibt, trägt uns hoch über Städten und Feldern, Meeren und Gebirgen an ein fernes Ziel.

„Verbrennungskraftmaschinen" nennen sich die Zauberer, die Kraftwagen und Traktoren, Motorboote und Flugzeuge in Bewegung setzen. Sie sind heute so bekannt, daß wahrscheinlich die meisten unserer Leser mehr von ihnen wissen, als wir hier darüber schreiben können.

Es hat, nachdem die Dampfmaschine ihren Siegeszug in der Industrie angetreten hatte, nicht an Versuchen gefehlt, sie auch in Straßenfahrzeuge einzubauen. In den ersten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts rumpelten und fauchten mehrfach unförmige Dampfwagen durch europäische Städte. Sie setzten sich nicht durch; denn die Dampfmaschine erwies sich für den Straßenverkehr als wenig geeignet: Sie war groß und schwer, die Dampferzeugung bereitete erhebliche Schwierigkeiten; und Qualm und Funkenflug waren nicht nur unangenehme, sondern auch gefährliche Beigaben. Im Schienenverkehr machten sich diese Nachteile nicht so sehr bemerkbar, doch für Straßenfahrzeuge mußte man einen anderen Antriebsmotor suchen.

Diesen „anderen Motor" suchten auch Handwerks- und Kleinbetriebe: Sie konnten sich weder die Anschaffung noch den Betrieb einer Dampfmaschine leisten.

So sehr die Dampfmaschine auch die Industrie und den Güter- und Personenverkehr revolutioniert hat – daß sie mit dem Brennstoff recht verschwenderisch umging, war auch damals schon bekannt. Man wußte außerdem, daß die Verluste in der Dampfmaschine vor allem daher kommen, daß die Wärmeenergie des Brennstoffes zunächst zur Dampferzeugung benutzt wird und daß erst der Dampf die gewünschte Arbeit liefert.

Konnte man diesen Umweg nicht umgehen und die Wärmeenergie unmittelbar in Antriebskraft verwandeln? Man erinnerte sich, daß schon 1680 Christian Huygens (1629 bis 1695) beabsichtigt hatte, einen Kolbenmotor zu bauen, der durch die Kraft explodierenden Schießpulvers getrieben werden sollte.

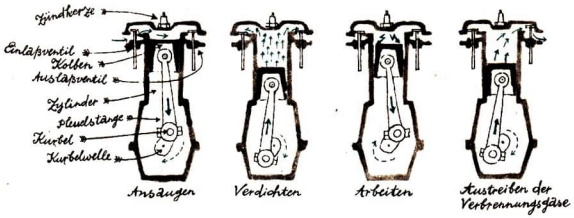
Freilich – eine „Schießpulvermaschine" hätte, selbst wenn ihre Konstruktion gelungen wäre, wohl kaum Abnehmer gefunden; denn der Umgang mit Sprengstoffen war damals weit gefährlicher als heute. Doch man hatte inzwischen andere Möglichkeiten kennengelernt: Verbrennt man ein Gas oder eine fein verteilte Flüssigkeit in einem geschlossenen Zylinder, so entstehen Verbrennungsgase hoher Temperatur und – da eine Ausdehnung nicht möglich ist – hohen Drucks. Sollte man nicht auf dieser Grundlage einen Motor bauen können?

1860 bot der Franzose Jean-Joseph-Etienne Lenoir (1822 bis 1900) einen Gasmotor an, der, wie die Werbesprüche verhießen, der Dampfmaschine den Todesstoß versetzen sollte. Damit allerdings war es vorerst noch nichts: Lenoirs Motor lärmte fürchterlich, besaß einen nur sehr niedrigen Wirkungsgrad und arbeitete nicht betriebssicher genug. Trotzdem wurden die Gasmotoren ein „Verkaufsschlager". Der Bedarf der Kleinbetriebe an Motoren war so groß, daß man ihre Mängel in Kauf nahm.

Doch auf der Pariser Weltausstellung des Jahres 1867 erhielt Lenoir die ersehnte Goldmedaille nicht. Sie wurde für den „geräuschlosen Gasmotor" der Deutschen Nikolaus Otto (1832 bis 1891) und Eugen Langen (1833 bis 1895) vergeben. Ihr Motor lief nicht nur viel ruhiger und gleichmäßiger als alle bisherigen Gasmotoren („geräuschlos" war er allerdings keineswegs), sondern hatte auch einen etwa dreimal höheren Wirkungsgrad als seine Vorläufer. In den nachfolgenden Jahren wurden die Gasmotoren verbessert, und als es gelang, nicht nur Gas, sondern auch ein Gemisch aus feinverteilten flüssigen Brennstoffen und Luft zum Antrieb des Motors zu verwenden, war der Weg für eine neue Art des Fahrzeugantriebs frei. Wenig später fuhren die ersten Automobile.

Schon Otto und Langen entwickelten den Viertaktmotor, dessen Grundzüge heute in ungezählten Verbrennungskraftmaschinen wiederkehren.

Die Hauptteile eines Viertaktmotors sind in der folgenden Abbildung festgehalten. Der Kolben kann gasdicht im Zylinder auf- und abgleiten. Seine Bewegung wird mit Pleuelstange und Kurbel auf die Kurbelwelle übertragen. Im oberen Teil des Zylindergehäuses sitzen zwei Ventile, deren Tätigkeit im Rhythmus der Kurbelwellenbewegung gesteuert wird. In den Zylinderraum ragt außerdem die „Zündkerze". Wird eine hohe elektrische Spannung an ihre „Elektroden" gelegt, so springt zwischen ihnen ein Funken über.



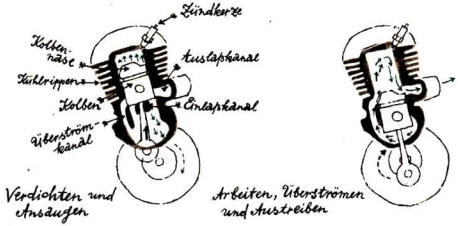
Beim ersten „Takt" des Motors, dem „Ansaugen", bewegt sich der Kolben von seiner höchsten Stellung bis zur tiefsten. Über dem Kolben entsteht ein Unterdruck, und durch das geöffnete Einlaßventil wird ein Gemisch angesaugt, das sich aus Luft und aus Kraftstoff in feinster, nebelartiger Verteilung zusammensetzt. Es entstammt dem „Vergaser".

Hat der Kolben seinen tiefsten Punkt erreicht, so schließt sich das Einlaßventil. Der zweite Takt, das „Verdichten", beginnt. Der aufwärtsgleitende Kolben drückt das Kraftstoffgemisch zusammen (bei Personenkraftwagen etwa bis auf $^1/_6$ bis $^1/_8$ des ursprünglichen Volumens). Dadurch steigen Druck und Temperatur des Gemischs; der Brennstoffnebel verdampft fast völlig. Damit werden günstige Voraussetzungen für den dritten Takt, den „Arbeitstakt", geschaffen.

Der Arbeitstakt beginnt mit dem Überspringen eines Funkens an der Zündkerze. Das Kraftstoff-Luft-Gemisch verbrennt sehr schnell, Druck und Temperatur steigen an und treiben den Kolben mit großer Kraft abwärts. Dabei gibt der Motor mechanische Energie ab.

Der vierte Takt endlich dient dem Austreiben der Verbrennungsgase. Der Kolben schiebt sie – bei offenem Auslaßventil – vor sich her; sie entweichen ins Freie.

Die Reihenfolge: Ansaugen, Verdichten, Arbeiten, Austreiben kennzeichnet den Viertaktmotor. Da nur auf jede zweite Umdrehung der Kurbelwelle ein Arbeitstakt entfällt, arbeitet der Viertaktmotor in der von uns beschriebenen Form „stoßweise". Um eine gleichmäßigere Energieabgabe herbeizuführen, koppelt man den Motor mit einem schweren Schwungrad, oder man läßt mehrere Zylinder auf eine Kurbelwelle arbeiten. In Straßenfahrzeugen und in der Luftfahrt werden überwiegend solche Mehrzylindermotoren eingesetzt. Die Takte ihrer Zylinder sind so aufeinander abgestimmt, daß jeweils ein Zylinder arbeitet, während die anderen ansaugen, verdichten oder die Verbrennungsgase ausstoßen.



Der „Zweitaktmotor" leistet bei *jeder* Umdrehung Arbeit und kommt ohne Ventile aus. Auch hier soll eine Skizze das Verständnis seiner Arbeitsweise erleichtern: Wir sehen im linken Bild, daß der Kolben beim Hochgehen das bereits im Zylinderraum befindliche Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichtet. Unter dem Kolben entsteht dabei ein Unterdruck; und weil der Kolben bei der Aufwärtsbewegung die Öffnung des Einlaßkanals freigibt, wird Kraftstoff-Luft-Gemisch angesaugt, das in den Raum unter dem Kolben strömt.

Ist der Kolben oben angelangt, so wird das verdichtete Gemisch über ihm gezündet. Die Verbrennungsgase treiben den Kolben abwärts; er leistet dabei mechanische Arbeit. Dabei verschließt er außerdem den Einlaßkanal, während Auslaß- und Überströmkanal freigegeben werden (rechtes Bild). Das unter dem Kolben befindliche Gemisch wird durch den Überströmkanal in den Raum über dem Kolben gedrückt. Die Kolbennase lenkt es so, daß es zunächst steil nach oben strömt, an der Oberseite des Zylinderraumes zurückgeworfen wird und die Reste der Verbrennungsgase des vorangegangenen Arbeitstaktes vor sich her durch den Auslaßkanal treibt. Die Kurbelwelle dreht sich weiter, der Auslaßkanal wird verschlossen, und das Spiel wiederholt sich.

Zweitaktmotoren haben sich ebenfalls überall eingebürgert. Sie sind robust, leicht und billig, und diesen Eigenschaften verdanken sie ihre Bevorzugung für Kleinfahrzeuge, Mopeds, Motorsägen, Rasenmäher. Die kleinsten Zweitaktmotoren lassen sich bequem in der Faust verbergen; sie sind für den Antrieb von Flugzeugmodellen bestimmt.

Die Motoren, die wir eben beschrieben haben, heißen zur Erinnerung an Nikolaus Otto „Ottomotoren". Sie sind auf leicht verdampfende Brennstoffe und auf eine Fremdzündung durch die Zündkerze angewiesen.

Daneben haben, besonders für schwere Fahrzeuge, für Lokomotiven und Schiffe, „Dieselmotoren" größte Bedeutung

gewonnen. Sie wurden von Rudolf Diesel (1858 bis 1913) erfunden.
Ein Dieselmotor saugt kein Kraftstoff-Luft-Gemisch an, sondern reine Luft. Sie wird stark verdichtet (bis auf etwa 50 at) und erhitzt sich dadurch auf 500 bis 700 °C. In diese heiße Luft wird mit einer Pumpe der Brennstoff eingespritzt. Er entzündet sich sofort, und die sich ausdehnenden Verbrennungsgase treiben den Kolben im Arbeitstakt abwärts.
Der Dieselmotor kann mit schwer entflammbaren, billigen Brennstoffen gespeist werden und erreicht trotzdem einen höheren Wirkungsgrad als der Ottomotor. Da sich der Kraftstoff von selbst entzündet, fallen sämtliche Teile der elektrischen Zündanlage weg. Das verbilligt die Motoren. Auch einen Vergaser gibt es beim Dieselmotor nicht.
Otto- und Dieselmotoren erzeugen ursprünglich eine hin- und hergehende Bewegung. Eine stetige Kraftabgabe an die Kurbelwelle findet nicht statt (vgl. S. 28). Man versucht daher seit langem, Verbrennungsmotoren zu schaffen, die nur rotierende Teile enthalten. Hier ist vor allem die Gasturbine zu nennen, die sich in den vergangenen Jahren in der Luftfahrt, daneben aber auch für Schiffsantriebe und für ortsfeste Kraftanlagen bewährt hat. Auch Versuchsmuster von Kraftwagen mit Gasturbinenantrieb wurden bereits konstruiert und erprobt.

Heizen Sie mit kaltem Wasser!

Nein, die Überschrift ist kein Scherz; Sie werden es bald erfahren. Auch die Dame in der Straßenbahn hätte nicht zu lachen brauchen, als – doch hören Sie selbst:
Die Dame mit der verbundenen Hand: „Tut ekelhaft weh, solche Brandblase, und ausgerechnet am Handballen . . ."
Die Freundin: „Wie ist denn das passiert, am Herd?" „Nein, beim Staubwischen." „Am Ofen also?" „Nein, am Kühlschrank." „Bitte, sei doch nicht so albern!" „Bin ich ja gar nicht; ich hab' mich wirklich am Kühlschrank verbrannt."
Offengestanden – im ersten Augenblick war auch ich verdutzt; denn daß man sich ausgerechnet am Kühlschrank eine Brandblase holen kann, klingt wirklich paradox. Aber es stimmt: Die gewundenen Röhren und Bleche an der Rückseite eines Kühlschranks werden im Betrieb warm, an manchen Stellen sogar heiß, und ständig steigt über ihnen warme

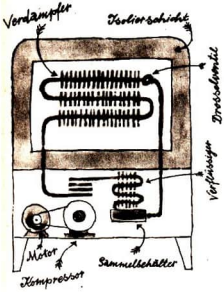
Luft empor. Außerdem steht in der Bedienungsanleitung sogar etwas von einer *Heiz*patrone. Also braucht man Wärme, um Speisen kühl und frisch zu halten? Doch genug der (scheinbaren!) Widersprüche. Sie werden sich lösen, wenn wir die „Eingeweide" eines Kühlschranks etwas näher kennengelernt haben.

Seine physikalische Grundlage kennen wir schon: Damit ein Stoff verdampfen oder verdunsten kann, müssen ihm erhebliche Wärmemengen zugeführt werden (vgl. S. 139). Beim Wasserkochen besorgt das die Gasflamme; doch wenn es keine besondere Wärmequelle gibt, entzieht der verdampfende oder verdunstende Stoff diese Wärme seiner Umgebung – sie kühlt sich ab. Es gibt zahlreiche Flüssigkeiten, die bereits bei sehr niedriger Temperatur verdampfen und dabei ihre Umgebung bis weit unter den Gefrierpunkt abkühlen können. Schwefeldioxyd und Isobutan sieden bereits bei −10 °C, Methyläther bei −24 °C, Ammoniak bei −33,4 °C, Difluordichlormethan („Frigen") bei −29,8 °C.

Besonders Ammoniak und Frigen finden als „Kältemittel" in Kühlanlagen Verwendung. Im Kühlkörper („Verdampfer") des Kühlschranks, einem Rohrsystem, das zum besseren Wärmeaustausch mit zahlreichen großflächigen Rippen versehen ist, verdampft das Kältemittel und entzieht dabei dem Schrankinneren Wärme.

Damit die Kühlwirkung nicht aufhört, sobald das Kältemittel verdampft ist, muß dem Verdampfer ständig neues, flüssiges Kältemittel zugeleitet werden. Zu diesem Zweck wird der Kältemitteldampf wieder verflüssigt und dann im Kühlkörper erneut verdampft. So vollzieht das Kältemittel einen ständigen Kreislauf.

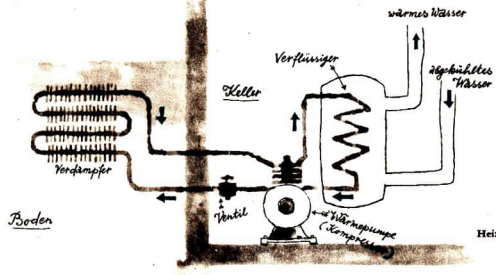
Beim „Kompressorkühlschrank" geschieht das folgendermaßen: Ein Kompressor (vgl. S. 116), der durch einen Elektromotor angetrieben wird, saugt den im Verdampfer entstehenden Dampf an und verdichtet ihn. Dabei steigen Druck und Temperatur des Kältemitteldampfes. Der Dampf wird vom Kompressor in den „Verflüssiger" gepumpt, ein Rohrsystem, das gleichfalls mit Kühlrippen versehen ist und sich meistens an der Rückseite des Kühlschranks befindet. Dort gibt der Dampf die im Kompressor aufgenommene Wärme und seine Verdampfungswärme an die Außenluft ab und wird dabei infolge des erhöhten Drucks wieder flüssig (der Siedepunkt einer Flüssigkeit steigt bei Druckzunahme, vgl. S. 140). Durch ein Drosselventil wird das verflüssigte Kältemittel dem Verdampfer wieder zugeführt. Der Kühlkörper wird kalt, die



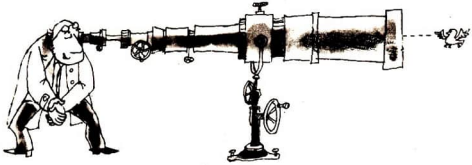
Aufbau eines Kompressorkühlschranks

Rippen des Verflüssigers werden warm: Mit Hilfe des umlaufenden Kältemittels wird gewissermaßen die Wärme aus dem Inneren des Kühlschranks in die Küche „gepumpt".
Sobald die Innentemperatur des Kühlschranks bis auf den gewünschten Wert abgesunken ist, setzt ein automatischer Temperaturregler den Motor außer Betrieb. Das Kühlfach ist durch wärmedämmende Stoffe gut gegen die Außenwelt isoliert und erwärmt sich infolgedessen nur sehr langsam. Hat die steigende Temperatur einen bestimmten Wert erreicht, schaltet sich der Motor selbsttätig wieder ein, und der Kühlvorgang beginnt erneut. Genaugenommen pendelt also die Temperatur im Kühlschrank zwischen zwei Werten, doch kann man ihren Unterschied so gering wählen, daß sich praktisch eine mittlere Kühltemperatur einstellt.
Kompressor und Motor enthalten zahlreiche bewegte Teile und sind infolgedessen einem Verschleiß unterworfen, der zu Störungen führen kann. Diesen Nachteil besitzen „Absorptionskühlschränke" nicht. An die Stelle des Kompressors und des Motors tritt bei ihnen ein „Absorber". Er enthält chemische Stoffe, die den Kühlmitteldampf begierig aufsaugen. Ist das Kühlmittel verdampft und hat sich der Absorber vollgesogen, so wird eine elektrische Heizung eingeschaltet, die den Absorber erwärmt. Dadurch verdampft das Kühlmittel, sein Druck erhöht sich, und es wird dem Verflüssiger zugeleitet, von wo aus es wieder dem Verdampfer zufließt. Absorptionskühlschränke arbeiten sehr betriebssicher und lassen sich nicht nur mit elektrischem Strom, sondern auch mit Gas betreiben; welcher Art die zum Heizen des Absorbers benötigte Wärmequelle ist, bleibt sich gleich.
Inzwischen wird uns klargeworden sein, warum sich die Dame aus der Straßenbahn am Kühlschrank verbrennen konnte, und wir werden auch verstehen, daß tatsächlich Wärme notwendig ist, um zu kühlen. Der eigentliche physikalische Grund ist darin zu suchen, daß Wärme stets nur von einem Körper höherer auf einen Körper niederer Temperatur von allein übergeht, daß aber für einen Wärmetransport in umgekehrter Richtung zusätzliche Energie benötigt wird. Das ist ein Naturgesetz, das uns von klein auf vertraut ist. Oder würden Sie erwarten, daß ein kaltes Zimmer sich von allein weiter abkühlt und mit der dabei abgegebenen Wärme das geheizte Zimmer nebenan noch mehr erwärmt?
Der Kühlschrank kühlt die Speisen und „heizt" die Küche. Es wäre also sinnlos, im Sommer seine Tür offenstehen zu lassen, damit sich die Küche abkühle: Die Wärme, die der

Küchenluft vom Verdampfer entzogen wird, wird ihr vom Verflüssiger zurückgegeben.
Wie aber wäre es, wenn man den Verdampfer ausbaute und vor das Fenster hängte? Jetzt würde die Außenluft abgekühlt, die Luft in der Küche aber erwärmt. Der Kompressor des Kühlschranks wäre zur „Wärmepumpe" geworden.
In der Schweiz zum Beispiel werden große Verwaltungsgebäude mit Wärmepumpen geheizt. Im Erdboden oder in Flußwasser wird ein großer Kältemittelverdampfer versenkt. Er kühlt den Boden oder das Flußwasser weiter ab, das heißt, er entzieht ihnen Wärme. Der Dampf wird von einem Kompressor angesaugt, verdichtet und gibt seine Verdampfungswärme in einem Verflüssiger an Wasser ab, mit dem die Warmwasserheizung des Gebäudes versorgt wird.
Zum Betrieb des Kompressors ist natürlich Arbeit erforderlich, doch beträgt dieser Energieaufwand nur etwa ein Drittel der „geförderten" Wärmemenge. Besonders wirtschaftlich arbeiten derartige Anlagen, wo billige Elektroenergie aus Wasserkraftwerken zur Verfügung steht (gerade das ist in der Schweiz der Fall).
Im Sommer kann man Heizanlagen mit Wärmepumpen „andersherum" laufen lassen. Sie pumpen dann die überschüssige Wärme aus den Räumen in das Erdreich oder in Flußwasser. Die Heizung wird zur Kühlanlage.
Klimaanlagen, die nach diesen Grundsätzen konstruiert wurden, gibt es bereits in vielen Ländern. Sie könnten – sofern nicht noch bessere Heizverfahren entdeckt werden – schon in naher Zukunft unsere Wohnsiedlungen von allen Unannehmlichkeiten der heute noch verbreiteten Ofenheizung befreien. Vor allem würden sie dazu beitragen, die für die chemische Industrie so unentbehrlichen Kohlevorräte zu strecken.



Heizanlage mit Wärmepumpe

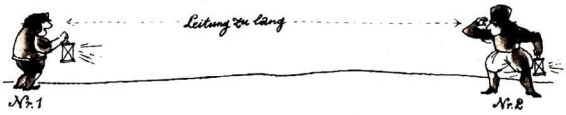


Meßstrecke im Weltall

Daß Licht sich mit einer Geschwindigkeit von 300000 km/s ausbreitet, lernt man heute bereits in der Grundschule. Nicht weniger bekannt ist, daß Radiowellen sich ebenso schnell fortpflanzen[1]. Es ist gar nicht einfach, sich eine solche Geschwindigkeit vorzustellen: Knapp $^1/_{500}$ s brauchte das Licht von Berlin bis Warschau; in etwas mehr als $^1/_{200}$ s wäre es in Moskau angelangt, und Funkzeichen sind von New York bis nach Mitteleuropa nur $^1/_{50}$ s unterwegs. Bis zum Mond sind es zwar fast 400000 km, doch auch diese Strecke legt das Licht in etwas mehr als 1 s zurück. Der Sonnenstrahl, der uns bräunt, hat zwar bereits eine Reise von rund 150 Millionen Kilometern hinter sich, aber er benötigte dafür nur $8^1/_2$ Minuten. Knipsen wir jedoch unsere Leselampe an, so dringt ihr Licht in weniger als dem sechzigmillionsten Teil einer Sekunde bis in die entfernteste Zimmerecke.

Welche winzige Zeitspannen! Welche Geschwindigkeit! Wie konnte man sie überhaupt messen? Galilei versuchte es so: Zwei Männer, jeder mit einer Blendlaterne ausgerüstet, wurden in vorher vermessenem Abstand aufgestellt. Auf ein Zeichen Galileis öffnete „Nr. 1" rasch die Blende seiner Lampe. „Nr. 2" hatte den Auftrag, seine Lampe aufblitzen zu lassen, sobald er das von der anderen Lampe herrührende Licht wahrnahm. Der Schein der zweiten Lampe wiederum

[1] Diese Gleichheit ist kein Zufall. Die Radiowellen und das Licht gehören zur großen Familie der elektromagnetischen Wellen; ihre Behandlung gehört nicht zum Themenkreis dieses Buches. Es gibt jedoch in unserer Republik genügend leichtverständliche Literatur, die sich mit diesem Gebiet befaßt.

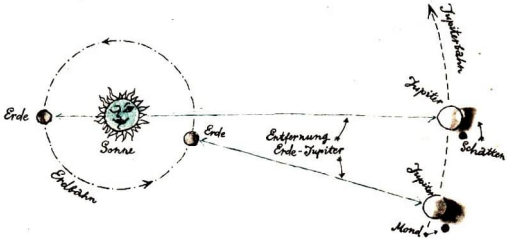


wurde am Standort von „Nr. 1" beobachtet. Die von Galilei erwartete Zeitdifferenz zwischen dem Aufblitzen der Lampe 1 und dem Wahrnehmen des Lichtes von Lampe 2 trat tatsächlich auf, nur hatte sie, wie Galilei enttäuscht erkannte, nichts mit der Lichtgeschwindigkeit zu tun: Bei jedem Versuch erhielt er ein anderes Ergebnis.

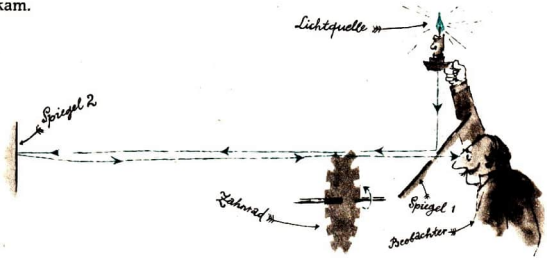
Galileis Experiment mußte fehlschlagen: Die Zeit, während der das Licht zwischen den beiden Laternen unterwegs war, ist verschwindend gering gegenüber der Zeitspanne, die der Beobachter benötigt, um den Lichteindruck zu „verarbeiten" und darauf zu reagieren. Auch andere Versuche, die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen, scheiterten. Die Meßstrecken auf der Erde waren viel zu kurz, als daß man damals die Zeiten hätte bestimmen können, in denen sie vom Licht durcheilt wurden.

Strecken, für die ein Lichtstrahl längere Zeit braucht, gibt es nur im Weltraum. Deshalb verdanken wir die erste genauere Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit auch einem Astronomen, dem Dänen Olaf Römer (1644 bis 1710). Er beobachtete sorgfältig den Umlauf der vier von Galilei entdeckten großen Jupitermonde. Sie sind im Fernrohr gut zu sehen, „verschwinden" aber, sobald sie bei ihrem Umlauf in den Schatten des Jupiters eintreten.

Römer versuchte, die Ursachen einer Erscheinung zu finden, die den Astronomen aufgefallen war: Die Jupitermonde waren unpünktlich! Kam die Erde dem Jupiter auf ihrer Bahn näher, so tauchte der innerste Jupitermond früher als berechnet in den Schatten des Planeten; entfernte sich die Erde wieder vom Jupiter, so trat die Verfinsterung zu spät ein. Römer sagte sich: „Daß die Monde unregelmäßig umlaufen, ist sehr unwahrscheinlich; auch wäre der Zusammenhang mit der Erdbewegung unverständlich. Es ist daher anzunehmen,



daß wir die Verfinsterung nur später *sehen*, während sie in Wirklichkeit in immer gleichen Abständen auftritt. Daß wir sie aber später sehen, kann nur *eine* Ursache haben: Ist die Erde dem Jupiter nahe, so kommt die vom Licht getragene Kunde von der Verfinsterung schneller zur Erde, als wenn diese weiter vom Jupiter entfernt ist. Die scheinbare Verspätung entsteht dadurch, daß das Licht eine gewisse Zeit benötigt, um die zusätzliche Wegstrecke zurückzulegen."
Der Durchmesser der Erdbahn war bekannt. Die Zeit, die das Licht für diese Strecke brauchte, kannte man ebenfalls; denn diese Zeit war nichts anderes als die gemessene Verspätung (1000 s). Eine einfache Division (vgl. S. 53) ergab die Lichtgeschwindigkeit. Römer erhielt einen Wert, der dem heute allgemein verwendeten von 300000 km/s sehr nahe kam.



Auf der Erde konnte die Lichtgeschwindigkeit erst gemessen werden, als Instrumententechnik und physikalische Experimentierkunst bereits einen hohen Stand erreicht hatten.
Die erste derartige Messung führte im Jahre 1849 Armand H. Fizeau (1819 bis 1896) aus. Sein Verfahren erinnert an die „Pappscheibenmethode" zur Bestimmung von Geschoßgeschwindigkeiten (vgl. S. 56). Das Licht einer kräftigen Lichtquelle wird gebündelt und trifft auf einen schrägstehenden Spiegel (1), der mit einem kleinen Loch versehen ist. Er lenkt den Lichtstrahl so um, daß er auf einen einige Kilometer entfernten Spiegel (2) fällt (bei Fizeau betrug die Distanz etwa 8,3 km). Dieser ist so ausgerichtet, daß er das Licht genau in die Herkunftsrichtung, das heißt auf den schrägen Spiegel, zurückwirft. Durch das Loch kann der zurückkehrende Lichtstrahl beobachtet werden.
Der Lichtstrahl wird durch ein rotierendes Zahnrad gewissermaßen „zerhackt". Steht das Rad oder dreht es sich lang-

sam, so kehrt das Licht durch die gleiche Zahnlücke zurück, die es auf dem Wege zum Spiegel 2 passiert hat. Der Beobachter sieht das Licht zurückkommen. Steigert man jedoch die Drehzahl, so ist bei einer bestimmten Umdrehungsgeschwindigkeit das reflektierte Licht nicht mehr wahrzunehmen. Während der durch eine Zahnlücke freigegebene „Lichtschub" zum Spiegel 2 und zurück lief, hat sich das Rad um so viel weitergedreht, daß das zurückkehrende Licht keine Lücke mehr vorfindet und infolgedessen auch den Spiegel 1 nicht mehr erreichen kann. Nimmt die Drehzahl weiter zu, so hellt sich das Blickfeld wieder auf: Der reflektierte Lichtstrahl tritt durch die folgende Lücke.

Aus der Umdrehungszahl des Rades, aus der Zahl seiner Zähne und aus der Laufstrecke des Lichtes läßt sich die Lichtgeschwindigkeit errechnen. Auch der Wert, den Fizeau erhielt, lag sehr nahe bei 300 000 km/s.

Fizeaus Messungen gelten noch heute als experimentelle Leistung ersten Ranges. Man stelle sich – um nur eine Schwierigkeit herauszugreifen – einmal vor, was es bedeutet, einen Spiegel so auszurichten, daß ein aus 8 km Entfernung reflektierter Strahl auf den Ausgangspunkt zurückfällt.

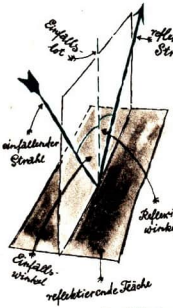
Nach Fizeaus Verfahren und auch nach zahlreichen anderen, später entwickelten Methoden wurde die Lichtgeschwindigkeit immer wieder und mit immer größer werdender Genauigkeit gemessen. Als genauester Wert gilt heute für den leeren Raum 299 793 km/s (mit einer Unsicherheit von ± 3 km); die Lichtgeschwindigkeit in Luft ist nur um eine Kleinigkeit geringer. Wir dürfen also für die Lichtgeschwindigkeit in Luft oder im Weltraum unbedenklich 300 000 km/s einsetzen. In anderen Stoffen pflanzt sich das Licht langsamer fort. In Wasser beträgt seine Geschwindigkeit 225 000 km/s, in Glas, je nach Glasart, bis 200 000 km/s.

Die Lichtgeschwindigkeit ist die größte physikalisch mögliche Geschwindigkeit. Kein Körper kann bis auf Lichtgeschwindigkeit oder gar darüber beschleunigt werden. Leider müssen wir uns versagen, die Gründe hierfür zu erörtern. Immerhin ist es sehr reizvoll, sich auszumalen, was geschähe, wenn es ein Gefährt mit Überlichtgeschwindigkeit gäbe: Lichtstrahlen, die gestern, vor einer Woche oder vor vielen Jahrhunderten die Erde verlassen haben, würden wir im Laufe der Zeit einholen und überholen. Vor unseren Augen liefe die Weltgeschichte, rollte die Zeit in umgekehrter Richtung ab. Welche Möglichkeiten für den Historiker – und welches Thema für die Autoren utopischer Romane!

Licht breitet sich, wie jeder Schatten beweist, geradlinig aus. Wir sind daran so gewöhnt, daß wir es als selbstverständlich empfinden, nicht hinter den Horizont sehen zu können, und daß unser Auge sich immer täuschen läßt, wenn Licht einmal nicht geradeaus, sondern „um die Ecke" geht. Doch davon später – vorerst gibt es eine viel wichtigere Frage zu beantworten: Wie sehen Lichtstrahlen aus?
Sie „sehen" gar nicht „aus"; denn die durch die Welt eilenden Lichtstrahlen sind unsichtbar. Wir entdecken einen Sonnenstrahl erst, wenn er Körper beleuchtet: Nebel, Rauch oder staubhaltige Luft wie die winzigen „Sonnenstäubchen" im Zimmer. Lichtstrahlen, die durch den Weltraum oder durch völlig reine Luft gehen, bleiben uns verborgen; wir können allenfalls ihre Quelle oder ihr Ziel, den beleuchteten Gegenstand, sehen.
Doch es kommt noch besser! Auch den unsichtbaren Lichtstrahl gibt es in Wirklichkeit nicht. Selbst der dünnste Lichtstrahl ist ein Licht*bündel,* das heißt, er besitzt einen gewissen Querschnitt. Der Lichtstrahl, den sich der Physiker „unendlich dünn" denkt, ist eine ebensolche Hilfsvorstellung wie die „Linie" des Mathematikers. Auch sie kann nur gedacht, nicht aber verwirklicht werden, weil selbst der feinste Strich in Wahrheit ein Band von einer gewissen Breite ist.
Wie nützlich die mathematische Linie ist, wissen wir – hoffentlich – noch aus unserer Schulzeit. Wie sehr uns die Vorstellung des unendlich dünnen Lichtstrahls helfen kann, werden wir schon auf den nächsten Seiten erfahren.

Der Blick in den Spiegel

Als Sie vor zehn, zwanzig oder dreißig Jahren Ihren ersten Gummiball bekamen, begannen Sie, wenn auch unbewußt, ein wichtiges physikalisches Gesetz zu studieren. Sie erinnern sich doch noch: Schossen Sie den Ball mit der Fußspitze nach oben, und fiel er fast senkrecht zur Erde zurück, so sprang er ebenso steil wieder empor. Ein flacher Wurf verursachte einen flachen Abpraller vom Boden; und wenn der Ball schräg auf eine Mauer traf, wurde er stets nach der dem Werfer abgewandten Seite gelenkt.
Schon damals haben Sie gemerkt, daß dieses Verhalten des Balls kein Zufall ist, sondern sich unter gleichen Voraussetzungen stets wiederholt. Auch später, beim Billard- oder



Das Reflexionsgesetz

Tennisspielen, hat sich Ihnen immer wieder bestätigt: Trifft ein elastischer Körper auf eine ebene Fläche, so sind Aufprall- und Rückprallwinkel gleich.

Dieses „Reflexionsgesetz" gilt auch für Licht: Fällt ein Lichtstrahl auf eine reflektierende Fläche, so ist der „Einfallswinkel" gleich dem „Reflexionswinkel". Außerdem liegen einfallender Strahl, reflektierter Strahl und „Einfallslot" in einer Ebene.

Die Bedeutung der drei Fachausdrücke geht aus dem Bild hervor. Das Einfallslot ist demnach die Gerade, die im Auftreffpunkt des Lichtstrahls auf der reflektierenden Fläche senkrecht steht; Einfalls- und Reflexionswinkel werden zwischen diesem Lot und dem betreffenden Strahl gemessen.

Die meisten Körper werfen Licht in „diffuser Reflexion" nach allen Seiten zurück. Ihre Oberfläche weist winzige Unebenheiten auf, an deren „Abhängen" die Lichtstrahlen – jeweils streng nach dem Reflexionsgesetz – zurückgeworfen werden.

Diffuse Reflexion

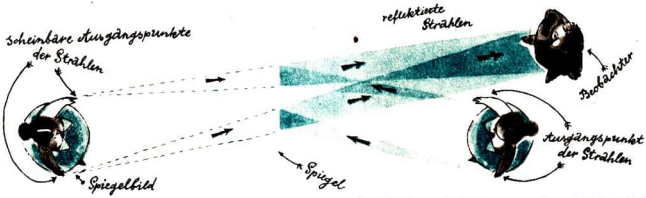
Daß wir die Welt sehen können, verdanken wir hauptsächlich der diffusen Reflexion; denn Gegenstände, die nicht selbst leuchten, werden dadurch sichtbar, daß sie empfangenes Licht mehr oder weniger nach allen Seiten reflektieren.

Ein Körper erscheint uns rot, wenn er vorwiegend rotes Licht zurückwirft; er sieht grün aus, wenn er vor allem grünes Licht reflektiert, und weiß, wenn er Licht sämtlicher Farben gleichmäßig zurückstrahlt. Allerdings ergeben auch zahlreiche Kombinationen von Einzelfarben Weiß.

Mitunter ist eine reflektierende Fläche eben und so „glatt", daß sie parallel einfallende Lichtstrahlen auch wieder als Parallelstrahlen zurückwirft. Das nennt man Spiegelung. Sie tritt zum Beispiel an polierten Metallgegenständen, an Glasscheiben oder an einer ruhigen Flüssigkeitsoberfläche auf.

„Richtige" Spiegel bestehen meistens aus einer möglichst ebenen und fehlerfreien Glasplatte, auf die ein hauchdünner Metallbelag (etwa Silber oder Aluminium) aufgedampft wurde. Diese Schicht ist gegen Beschädigungen sehr empfindlich. Sie wird daher bei Spiegeln für den täglichen Gebrauch auf der geschützten Hinterseite der Glasplatte angebracht. Für Spezialzwecke, etwa in wissenschaftlichen Instrumenten, finden auch Spiegel Verwendung, die ihre reflektierende Schicht auf der Vorderseite tragen oder lediglich aus einer besonders sorgfältig bearbeiteten und polierten Metallplatte bestehen.

Zwei Umstände wirken bei der Entstehung eines „Spiegelbildes" zusammen: Lichtstrahlen, die von Punkten eines vor



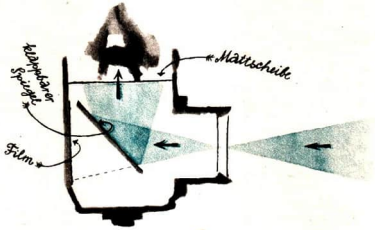
So entsteht, vom Beobachter aus gesehen, ein Spiegelbild

dem Spiegel befindlichen Gegenstandes ausgehen, werden nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen. Das Auge des Beobachters aber „weiß" nicht, daß die vom Spiegel kommenden Strahlen „um die Ecke" gingen. Es verlängert sie selbsttätig nach rückwärts, und infolgedessen scheinen sie von einem hinter dem Spiegel liegenden Punkt zu kommen. In dem Bild oben ist dieser Strahlengang für zwei Punkte eingezeichnet. Da von allen Stellen eines Körpers Licht ausgeht, das am Spiegel reflektiert wird, sehen wir sein Spiegelbild. Es ist ebenso groß wie der gespiegelte Gegenstand und scheint ebenso weit hinter dem Spiegel zu liegen wie der Körper davor. Seine Seiten sind vertauscht; aus rechts wurde links und umgekehrt. Das Spiegelbild ist ein scheinbares, ein „virtuelles" Bild. Wir können es weder „anfassen" noch mit einem hinter dem Spiegel stehenden Papierschirm auffangen.

Uns überrascht die Existenz des Spiegelbildes nicht, denn wir begegnen ihm seit unserer Kindheit täglich. Auch erkennen wir meistens einen Spiegel sofort an kleinen Fehlern oder an seiner Begrenzung. Tiere dagegen versuchen immer wieder, mit ihrem Spiegelbild näheren Kontakt zu bekommen, indem sie hinter den Spiegel laufen oder greifen. Allerdings läßt sich auch unser erfahrenes Auge leicht täuschen: Betreten wir einen Raum, an dessen Wänden große Spiegel angebracht sind, so versetzen uns die verschiedenen Spiegelbilder in erhebliche Verwirrung.

Schließt man einen langen, geraden Gang durch einen die ganze Breite und Höhe ausfüllenden Spiegel ab, so sind Besucher immer wieder verblüfft, wenn ihnen ihr Doppelgänger entgegenkommt. „Spiegeltricks" sind daher bewährte Hilfsmittel aller Zauberkünstler.

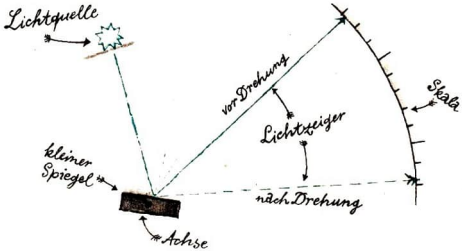
Von den technischen Anwendungen des Spiegels sei zunächst die Spiegelreflexkamera erwähnt. In ihr treffen die vom Objektiv eingefangenen Lichtstrahlen auf einen Spiegel, der sie um 90 Grad nach oben umlenkt. Auf einer waagerechten



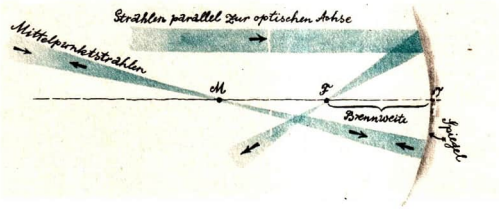
Mattglasscheibe, die sich gut von oben betrachten läßt, entsteht das vom Objektiv gezeichnete Bild (s. S. 187). Es ist ein wirkliches, ein „reelles", wenn auch verkleinertes Bild der vor der Kamera liegenden Szenerie. Beim Betätigen des Auslösers klappt der Spiegel nach oben und gibt den Lichtstrahlen den Weg zum Film frei. Daß die Mattscheibe das Bild ebenso groß zeigt, wie es auf dem Film erscheint, und daß man die Kamera bei Aufnahmen nicht in Augenhöhe zu heben braucht, sind wichtige Vorzüge der Spiegelreflexkamera.

Eine wertvolle Hilfe bei Präzisionsmessungen ist oft der „Lichtzeiger". Es kommt häufig vor, daß ein Instrument bei irgendwelchen Messungen nur sehr wenig ausschlägt. Damit der Ausschlag trotzdem deutlich festzustellen ist, müßte man den Instrumentenzeiger sehr lang machen. Sein Gewicht und seine Trägheit würden die Messung stören.

Bringt man dagegen auf der Achse des Meßinstruments einen kleinen Spiegel an, der von einem schmalen Lichtbündel getroffen wird, so kann man den reflektierten Strahl als gewichtslosen, oft meterlangen Zeiger benutzen. Die Ablesegenauigkeit erhöht sich nicht nur durch die Zeigerlänge, sondern auch, weil der reflektierte Strahl bei jeder Spiegeldrehung um den doppelten Betrag geschwenkt wird. Bei



einer Spiegeldrehung um 1° zum Beispiel würden nach dem Reflexionsgesetz der Einfalls- *und* der Reflexionswinkel um je 1° verändert. Der reflektierte Strahl dreht sich daher um 2°. Sie können das mit einer Lampe und einem Taschenspiegel jederzeit nachprüfen.
Im Sextanten, einem wichtigen Instrument für die Navigation und für astronomische Messungen, wird ein kleiner Spiegel so lange gedreht, bis die Horizontlinie und das Bild eines anvisierten Sternes sich decken. An einer in Winkelgraden geeichten Skala kann dann sofort die Sternhöhe über dem Horizont abgelesen werden. Diese Angabe ist zum Beispiel für astronomische Ortsbestimmungen sehr wichtig.
Gekrümmte, blanke Flächen spiegeln auch – aber wie sehen die Spiegelbilder aus! Manchmal sind sie verkleinert, manchmal sind sie vergrößert, meistens sind sie überdies mehr oder weniger verzerrt. Ursache dieser Erscheinungen ist die Krümmung der Flächen. Mit Hilfe des Reflexionsgesetzes und „gedachter" idealer Lichtstrahlen werden wir das sofort ergründen.
Beginnen wir mit dem Hohl- oder Konkavspiegel, den wir uns als einen Teil der spiegelnden Innenfläche einer Kugel vorstellen können. *M* ist der Mittelpunkt dieser Kugel. Sämtliche Lichtstrahlen, die den Spiegel treffen, werden nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen. Dabei gibt es Strahlen, die für uns besonders interessant sind.



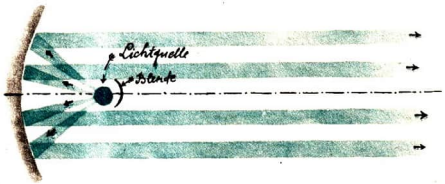
Zu ihnen gehören vor allem die „Mittelpunktsstrahlen", das sind alle Strahlen, die durch *M* verlaufen. Sie treffen immer senkrecht, in Richtung des jeweiligen Einfallslotes auf den Spiegel und werden infolgedessen in sich selbst reflektiert.
Eine Sonderstellung nehmen auch Lichtstrahlen ein, die nahe und parallel zu *MO*, zur sogenannten optischen Achse, verlaufen. Treffen sie den Spiegel, werden sie so reflektiert, daß sie sich sämtlich in einem Punkt schneiden. Er liegt auf der

optischen Achse, halbiert die Strecke *MO* und heißt „Brennpunkt" (*F*). Die Strecke *FO* ist die „Brennweite" des Spiegels. Vor einem Rasierspiegel, den wir in das Sonnenlicht halten und vor den wir etwas Rauch blasen, können wir das kegelförmige Lichtbündel mit seiner im Brennpunkt liegenden Spitze deutlich sehen. Es gelingt außerdem ohne weiteres, leicht brennbare Stoffe im Brennpunkt zu entzünden, denn in ihm vereinigt sich auch die vom Spiegel reflektierte Wärmestrahlung (vgl. S. 130).

Anlagen zur Ausnutzung der Sonnenwärme, mit denen seit einigen Jahrhunderten immer wieder experimentiert wird, enthielten früher fast stets einen großen Hohlspiegel, der Sonnenlicht und Wärmestrahlung auf einen am Brennpunkt montierten Dampfkessel konzentrierte. Es gibt sogar (allerdings wenig glaubhafte) Berichte, nach denen hier und da im Altertum feindliche Flotten bereits vor ihrer Landung durch „Brennspiegel" in Brand gesteckt und zerstört worden sein sollen.

Drehen wir die Strahlrichtung um, das heißt, lassen wir Lichtstrahlen vom Brennpunkt ausgehen, so werden sie vom Spiegel so reflektiert, daß sie ihn als achsenparalleles Strahlenbündel verlassen.

Damit wären wir beim Scheinwerfer: Seine Lichtquelle befindet sich im Brennpunkt eines Hohlspiegels, und infolgedessen geht vom Scheinwerfer ein paralleles Strahlenbündel aus. An Fahrzeugscheinwerfern begegnen wir häufig Spiegeln mit parabelförmigem Querschnitt. Sie haben gleichfalls einen Brennpunkt und erzeugen Parallelstrahlen.

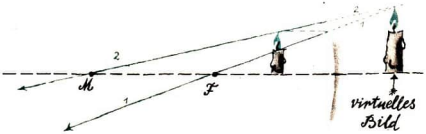


Hohlspiegel als Scheinwerfer

Aus den Skizzen auf S. 179 oben geht außerdem die Wirkungsweise des abblendbaren Scheinwerfers hervor: Der Glühfaden für „Fernlicht" steht im Brennpunkt des Scheinwerfers und schickt infolgedessen ein paralleles Strahlenbündel weit voraus auf die Fahrbahn.

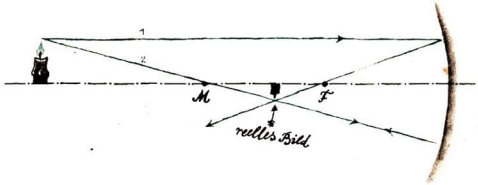
Der Glühfaden für „Nahlicht" ist vor dem Brennpunkt angebracht und nach unten abgeschirmt. Sein Licht wird von der oberen Hälfte des Scheinwerferspiegels schräg nach vorn auf die Fahrbahn reflektiert und blendet entgegenkommende Fahrzeuge nur wenig. Bei der Fahrradbeleuchtung wird ein ähnlicher Effekt durch ein zweites Glühlämpchen im Oberteil des Spiegels erzielt.

Warum aber sehen wir unser Gesicht vergrößert, wenn wir es einem Hohlspiegel nähern, bis es innerhalb der Brennweite liegt? Im folgenden Bild haben wir zwei Strahlen von einer Kerzenflamme herausgegriffen. Strahl 1 verläuft parallel zur optischen Achse und geht nach der Reflexion durch den Brennpunkt des Spiegels. Strahl 2 trifft den Spiegel senkrecht und wird in sich selbst reflektiert. Das Auge des Beobachters vor dem Spiegel verlängert beide Strahlen nach hinten bis zu ihrem scheinbaren Schnittpunkt. Er ist das „Bild" der Flammenspitze. Für alle anderen Punkte der Kerze könnten wir das eben vorgeführte Verfahren wiederholen. Als Resultat erhalten wir ein scheinbar hinter dem Spiegel befindliches vergrößertes Bild der Kerze.



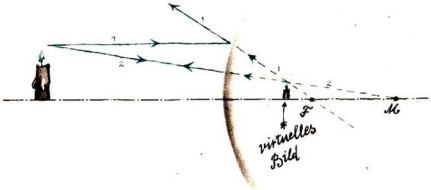
Gegenstand zwischen Brennpunkt und Spiegel

Rücken wir die Kerze weiter vom Spiegel ab, so entstehen reelle Bilder, die auf einem Blatt Papier aufgefangen werden können. Ihr Zustandekommen ist unten skizziert. Wieder halfen ein Mittelpunktstrahl und ein durch den Brennpunkt gehender Strahl bei der Konstruktion des Bildes. Gleichzeitig wird der Unterschied zum virtuellen Bild noch einmal deutlich: Jetzt schneiden sich die Lichtstrahlen nach der Reflexion tatsächlich in einem vor dem Spiegel liegenden



Gegenstand außerhalb der Brennweite

Punkt. Vorhin dagegen liefen die Lichtstrahlen nach der Reflexion in Wirklichkeit auseinander; nur unser Auge gaukelte uns in ihrer rückwärtigen Verlängerung Schnittpunkte vor.
Wird die spiegelnde Schicht auf der Außenseite einer Kugel angebracht, so erhalten wir den erhabenen Spiegel. Sein bekanntester Vertreter ist der Rückspiegel der Fahrzeuge, doch läßt sich seine Wirkung häufig auch an vernickelten Gefäßen und Weihnachtsbaumkugeln beobachten.

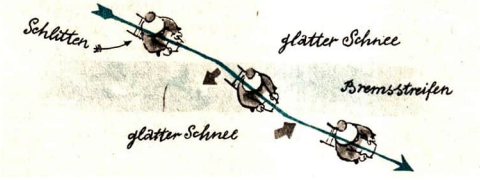


Der erhabene Spiegel (auch „Wölbspiegel" oder „Konvexspiegel" genannt) entwirft ausschließlich virtuelle, verkleinerte und aufrechtstehende Bilder: Strahl 1 trifft den Spiegel parallel zur optischen Achse, wird nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen und vom Auge nach rückwärts verlängert. Strahl 2 trifft senkrecht auf den Spiegel, wird in sich selbst reflektiert und ebenfalls vom Auge nach rückwärts verlängert. Im scheinbaren Schnittpunkt der Strahlen, hinter dem Spiegel, sehen wir die Spitze der Kerzenflamme.

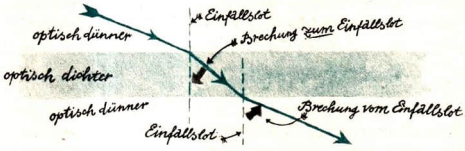
Der geknickte Löffel und die Rodelbahn

„Ich wette, der Bach ist keine vierzig Zentimeter tief, und wir können hinüber, ohne daß uns Wasser in die Stiefel läuft." „Und ich sage dir noch einmal: Du irrst dich, das Wasser ist viel tiefer als es scheint. Aber bitte, probier's doch!" „Werd' ich auch ... Na also ... habe ich nicht ..., verflixt noch mal!" Wenige Sekunden später stehen *beide* Streithälse wieder am Ufer; der eine schüttet das Wasser aus seinen Schaftstiefeln, der andere lacht ihn deswegen aus.
Der Streit am Bach war überflüssig, denn es ist eigentlich allgemein bekannt, daß Wasser, dessen Grund wir sehen, stets seichter erscheint, als es in Wirklichkeit ist. Sie können das an der gefüllten Badewanne oder an einer Wasserschüssel

selbst nachprüfen, indem Sie die Tiefe erst schätzen und dann mit einem Stock oder einem Löffelstiel abmessen.
Haben Sie es ausprobiert? Wenn Sie dabei Ihren Meßstab einmal schräg gehalten haben, ist Ihnen sicher noch etwas aufgefallen: Der Stab scheint an der Stelle geknickt zu sein, an der er den Wasserspiegel durchsticht. Auch der Löffel im Teeglas weist diesen scheinbaren Knick auf.
Durchlaufen Lichtstrahlen zwei verschiedene, durchsichtige Stoffe, so ändern sie an der Grenze ihre Richtung, sie werden „gebrochen". Um zu begreifen, wie das kommt, versetzen wir uns einmal in Gedanken an einen Rodelhang. Es soll ein besonderer Hang sein, denn quer zu seiner Fläche ziehe sich ein Streifen hin, bei dessen Überfahren die Schlitten gebremst werden – sei es, daß auf diesem Streifen Grasbüschel den Schnee durchstoßen, sei es, daß ein unsportlicher Bösewicht dort Asche oder Sand gestreut hat.
Was passiert auf dieser so präparierten Rodelbahn? Zunächst: Alle Schlitten werden gebremst, wenn sie den hemmenden Streifen überqueren. Es geschieht aber noch viel mehr: Nur Schlitten, die den Streifen genau im rechten Winkel treffen, gleiten in ihrer ursprünglichen Richtung weiter. Sämtliche Schlitten, die schräg zum Streifen anfahren, ändern ihre Richtung, sobald sie den Beginn des Streifens überqueren.
Die Erklärung entnehmen wir der Skizze: Der Schlitten gelangt zuerst mit seiner rechten Kufe auf den Bremsstreifen; die linke bewegt sich noch für einen Augenblick mit der alten, größeren Geschwindigkeit weiter. Infolgedessen wird der Schlitten herumgerissen und fährt mit veränderter Richtung über den Bremsstreifen. Die Fahrtrichtung des Schlittens wird „gebrochen". Kommt der Schlitten auf dem Streifen nicht zum Stillstand, so ändert sich die Richtung beim Verlassen des Streifens erneut, diesmal jedoch nach der anderen Seite: Die rechte Kufe gelangt zuerst auf glatten Schnee, die linke wird noch einen Augenblick länger gehemmt.



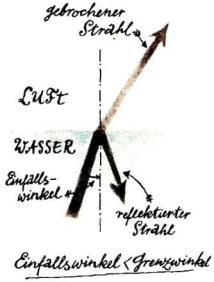
Lichtstrahlen verhalten sich beim Übergang von einem Stoff in den anderen ähnlich wie die Rodelschlitten unseres Beispiels: Treten sie in einen Stoff ein, in dem sich das Licht langsamer fortpflanzt (man nennt einen solchen Stoff „optisch dichter"), so werden sie zum Einfallslot hin gebrochen; dringen sie in einen Stoff größerer Lichtgeschwindigkeit (einen „optisch dünneren" Stoff) ein, so werden sie vom Einfallslot weggebrochen. Einfallender Strahl, ausfallender Strahl und Einfallslot liegen, wie bei der Reflexion, in einer Ebene. Um wieviel sich die Richtung des Strahls ändert, hängt vor allem vom Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in den beiden Stoffen ab.



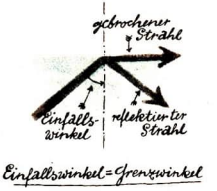
Jetzt ist verständlich, warum ein durchsichtiges Gewässer zu seicht erscheint und ein Stab an der Wasseroberfläche scheinbar geknickt wird. Die vom Unterwasserteil des Stabes ausgehenden Lichtstrahlen treten an der Wasseroberfläche in einen optisch dünneren Stoff, denn die Lichtgeschwindigkeit ist in Luft größer als im Wasser. Sie werden infolgedessen vom Einfallslot weggebrochen. Unser Auge jedoch verlängert die Lichtstrahlen unwillkürlich in ihrer neuen Richtung nach rückwärts und sieht daher das Stabende (und die übrigen Unterwasserteile des Stabes) „zu hoch". Ebenso ist es mit Lichtstrahlen, die vom Grunde eines Teiches oder eines Baches in das Auge gelangen.

Es gibt einen einfachen Versuch, um das zu demonstrieren: Legen Sie eine Münze so in einen Topf mit undurchsichtigen Wänden, daß sie bei schräg-seitlicher Betrachtung eben durch die Topfwand verdeckt wird. Sobald Sie den Topf mit Wasser füllen, wird die Münze (bei unverändertem Beobachtungsort) sichtbar. Es gelangen jetzt Lichtstrahlen in das Auge, die von der Münze steil hochgehen, am Wasserspiegel gebrochen werden und so die undurchsichtige Topfwand umgehen. Wir sehen die Münze, wenn auch nicht an der Stelle, wo sie sich in Wirklichkeit befindet.

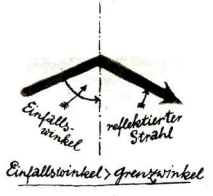
Wir haben bei der Behandlung der Lichtbrechung bisher etwas übersehen: Licht wird an einer Grenzfläche nicht nur gebrochen, sondern auch teilweise reflektiert: Jede Glasscheibe wirkt nebenher auch mehr oder weniger als Spiegel. Diese Reflexion vollzieht sich nach dem uns bekannten Reflexionsgesetz. Der reflektierte Teil des Lichtes wird wichtig, wenn Licht aus einem optisch dichteren in einen optisch dünneren Stoff übergeht, also zum Beispiel aus Glas in Luft oder aus Wasser in Luft. Würden wir den Einfallswinkel allmählich immer mehr vergrößern, so verliefe der gebrochene Strahl immer flacher. Gleichzeitig könnten wir feststellen, daß der Anteil des in die Flüssigkeit zurückgeworfenen Lichtes immer größer würde.



Bei einem ganz bestimmten Winkel, dem „Grenzwinkel", gelangt der gebrochene Strahl überhaupt nicht mehr ins Freie, sondern verläuft streifend parallel zur Grenzfläche. Vergrößern wir den Einfallswinkel noch weiter, so tritt „Totalreflexion" ein: Das gesamte Licht wird jetzt, als wenn die Wasseroberfläche ein Spiegel wäre, in die Flüssigkeit zurückgeworfen.

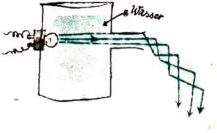


Sie können die Auswirkungen der Totalreflexion sofort beobachten, wenn Sie schräg von unten gegen eine Wasserfläche blicken, indem Sie ein gefülltes Glas mit nach oben gestrecktem Arm halten. Dann erscheint die Wasseroberfläche in einem silbrigen Glanz. Beleuchtet man einen Wasserstrahl „von innen her" so, daß an den Grenzen Wasser–Luft Totalreflexion eintritt, so bleibt das Licht im Wasserstrahl „eingesperrt". Es wird fortwährend zwischen seinen Begrenzungen hin- und herreflektiert; der Strahl leuchtet hell auf, während seine Umgebung dunkel bleibt. Bei der Illumination von Springbrunnen oder von Wasserfällen lassen sich durch die Totalreflexion überraschende Beleuchtungseffekte erzielen.

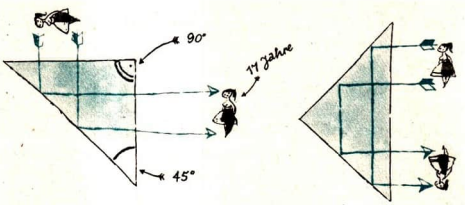


Auch in einem Glasstab läßt sich Licht „einsperren", wenn es seine Wandung unter einem Winkel trifft, der größer als der Grenzwinkel ist.

Wichtiger ist allerdings eine andere Anwendung der Totalreflexion. Sehr oft soll die Richtung von Lichtstrahlen um 90° oder um 180° verändert werden (vgl. S. 175). Das läßt sich leicht durch ein rechtwinkliges Prisma erreichen, dessen Seiten keinerlei spiegelnden Belag zu tragen brauchen. Die Abbildung auf S. 184 oben erübrigt jede Erklärung.

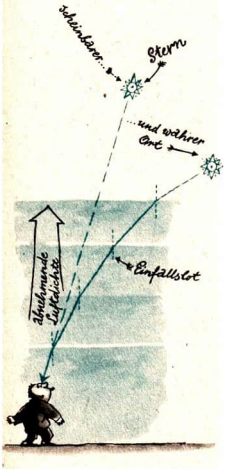


Brechung und Totalreflexion treten auch auf, wenn Schichten ein und desselben Stoffes, aber verschiedener Dichte zusam-



Wirkungsweise des Umkehrprismas

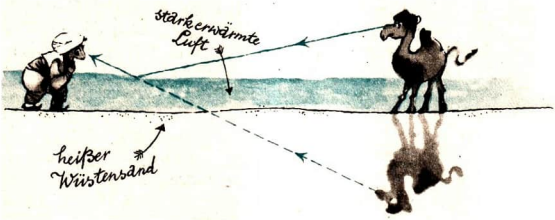
mentreffen. Steigt über der Heizung oder über einer Kerze warme Luft empor, so kann man „Schlieren" beobachten. Es sieht aus, als wehten unaufhörlich durchsichtige Schleier in der Luft. Hervorgerufen wird diese Erscheinung durch die Lichtbrechung an den sich ständig bewegenden Grenzen zwischen warmer und kühler Luft. Die Körper hinter dem aufsteigenden Luftstrom „flimmern" und sind nicht mehr ganz scharf wahrzunehmen. Dieses Flimmern ist im Sommer über heißen Bodenflächen fast stets zu sehen. Auch beim Zusammentreffen von kaltem und heißem Wasser können wir Schlieren beobachten. Sie haben im „Schlierenverfahren" sogar Eingang in die Forschung gefunden: Rasche Dichteschwankungen der Luft oder eines anderen Gases lassen sich durch die wechselnde Lichtbrechung sichtbar machen und fotografieren. Man kann auf diese Weise Strömungsvorgänge an schnell bewegten Körpern, zum Beispiel an Geschossen, studieren.



In der Erdatmosphäre, deren Dichte nach oben abnimmt, werden Lichtstrahlen gleichfalls abgelenkt. Allerdings ist es keine einmalige Brechung. Wir können uns vorstellen, daß die Lufthülle aus lauter dünnen Schichten verschiedener, nach unten zunehmender Luftdichte besteht. Jeweils an der Grenze einer solchen Schicht wird der Strahl fast unmerklich zum Einfallslot gebrochen, und die Gesamtheit dieser Ablenkung ergibt einen „gekrümmten" Lichtstrahl.

Ein Stern, der nicht gerade im Zenit steht, erscheint uns infolge der atmosphärischen Strahlenbrechung immer „zu hoch". Die Sonne ist, wenn wir sie untergehen *sehen*, in Wirklichkeit bereits hinter dem Horizont verschwunden; auch daß Sonne und Mond in Horizontnähe zusammengedrückt erscheinen, ist eine Folge der Strahlenbrechung: Das Licht vom unteren Sonnenrand wird stärker als das vom oberen gebrochen. Das Auge verlängert die Strahlen in gerader Linie nach rückwärts und gewinnt so den Eindruck einer abgeplatteten Sonne.

Nicht immer zeigt die Abnahme der Luftdichte ein normales Verhalten. So kommt es häufig vor, daß dicht über dem Boden eine warme und infolgedessen „optisch dünnere" Luftschicht liegt, der mit steigender Höhe eine kühle, „optisch dichtere" Schicht folgt. Fällt Licht schräg von oben auf die bodennahe Warmluft, so kann Totalreflexion eintreten. Im Sommer sehen wir über heißen Asphaltstraßen nicht nur die Luft „flimmern", sondern wir entdecken auch „Pfützen", in denen sich die Bäume spiegeln. Beim Näherkommen verschwindet die Erscheinung. Am Entstehen solcher Luftspiegelungen

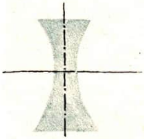


ist, wie wir sehen, nichts geheimnisvoll, auch dann nicht, wenn durch mehrfache Totalreflexion an Luftschichten verschiedener Dichte Inseln, Küsten oder Gebirge hoch am Himmel zu schweben scheinen.

Besonders häufig treten Luftspiegelungen naturgemäß in Wüstengebieten auf. Ihre unheimliche Wirkung wird allerdings häufig nicht allein durch die Lichtbrechung, sondern auch durch die überreizten Sinne der in der Sonnenglut Reisenden hervorgerufen. Daher glauben viele Beduinen, daß Luftspiegelungen das Werk der ihnen übelgesinnten Fee „Famurgan" seien. Ihr Name, „Famurgan", kehrt in der Bezeichnung „Fata morgana" wieder.

Linsen, nichts als Linsen

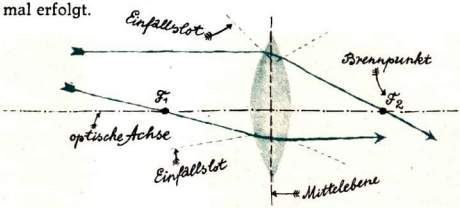
Konvexlinse



Konkavlinse

Seine wichtigste Anwendung findet das Brechungsgesetz in den „Linsen" der Fernrohre, Lupen, Mikroskope, Fotoapparate, Bildwerfer, Filmprojektoren, Brillen und zahlloser anderer Geräte. Wie eine Linse aussieht, braucht gewiß nicht erklärt zu werden. Doch sollten wir uns merken: Linsen, die am Rand dünner sind als in der Mitte, heißen „Konvexlinsen"; Linsen, die in der Mitte dünner sind als am Rand, nennt man „Konkavlinsen".

In jeder Linse wird das Licht zweimal gebrochen: Wenn es in die Linse eintritt (Übergang in einen optisch dichteren Stoff), zum Einfallslot, beim Austritt (Übergang in einen optisch dünneren Stoff) vom Einfallslot weg. Wir können jedoch, ohne einen großen Fehler zu begehen, annehmen, daß die gesamte Ablenkung in der Mittelebene der Linse und auf einmal erfolgt.

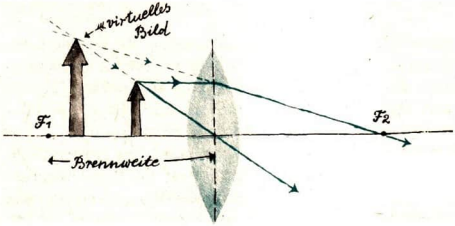


Lichtbrechung in der Konvexlinse

Die Konvexlinse ist uns als „Brennglas" und als „Vergrößerungsglas" vertraut. Sie sammelt parallel einfallendes Licht in einem „Brennpunkt" und heißt deshalb auch „Sammellinse". Da das Licht die Konvexlinse von beiden Seiten durchdringen kann, gibt es auf jeder Seite einen Brennpunkt.

Lichtstrahlen, die durch den Brennpunkt gehen oder dort ihren Ursprung haben, werden von der Linse so gebrochen, daß sie parallel zur optischen Achse weiterlaufen. Wir können also zusammenfassen: Strahlen durch den Brennpunkt werden zu Parallelstrahlen; Parallelstrahlen werden zu Strahlen durch den Brennpunkt. Halten wir noch eine Gesetzmäßigkeit fest: Strahlen durch den Linsenmittelpunkt ändern ihre Richtung nicht; sie erfahren lediglich eine seitliche Verschiebung parallel zu sich selbst. Sie ist häufig so geringfügig, daß wir sie unberücksichtigt lassen können.

Damit haben wir, wie beim Hohlspiegel, „besondere" Strahlen kennengelernt, mit deren Hilfe wir die Eigenschaften einer Linse untersuchen können.

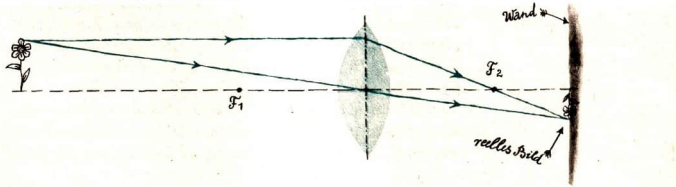


Konvexlinse als Vergrößerungsglas

Soll eine Konvexlinse „vergrößern", so muß man sie dicht an den zu betrachtenden Gegenstand halten. Eine einfache Messung würde ergeben, daß der Abstand Gegenstand–Mittelebene der Linse kleiner als die Brennweite sein muß. Zur Bildentstehung ist jetzt nicht mehr viel zu sagen: Wir erkennen den Verlauf der Parallel- und der Brennpunktstrahlen für zwei willkürlich herausgegriffene Punkte eines Gegenstandes. Das Auge verlängert die gebrochenen Strahlen wieder nach rückwärts bis zu ihrem scheinbaren Schnittpunkt. Es entsteht ein vergrößertes, scheinbares (virtuelles) Bild des Gegenstandes. Über die Anwendung der Vergrößerungsgläser, Lupen, Fadenzähler, Lesegläser oder wie immer man die zum Vergrößern dienende Konvexlinse nennt, hier noch Worte zu verlieren, hieße Eulen nach Athen tragen. Befindet sich ein Körper im Abstand zwischen einfacher und doppelter Brennweite, so entsteht ein vergrößertes, wirkliches Bild (vgl. S. 179).

Nehmen Sie lieber ein Vergrößerungsglas zur Hand und bewegen Sie es langsam auf die dem Fenster gegenüberliegende Wand zu. Sehr schnell werden Sie einen Abstand Linse–Wand finden, bei dem auf der Wand ein auf dem Kopf stehendes, verkleinertes Bild des Fensterausschnitts zu sehen ist. Ein solches wirkliches (reelles) Bild entsteht, wenn die Konvexlinse von Licht getroffen wird, das von einem außerhalb der doppelten Brennweite befindlichen Gegenstand herrührt. Auch diesmal können wir uns die Erklärung sparen, indem wir die Abbildung betrachten.

Konvexlinse entwirft ein reelles Bild



Unsere Spielerei an der Zimmerwand ist die physikalische Grundlage des Fotoapparates. Auch er zeichnet ein verkleinertes Bild der Szenerie, die sein Objektiv einfängt. An die Stelle der Wand tritt der lichtempfindliche Film, den Platz des Vergrößerungsglases nimmt das Objektiv ein.

Damit auf der Zimmerwand ein scharfes Bild entsteht, muß die Linse sich im richtigen Abstand von der Wand befinden. Dieser Abstand hängt, wie Sie leicht nachprüfen können, nicht nur von der Brennweite der Linse, sondern auch von der Entfernung des abzubildenden Gegenstandes ab: Je weiter er entfernt ist, desto geringer ist der Abstand Linse–Bild; je näher er kommt, desto weiter rückt sein Bild von der Linse ab. Für den Fotoapparat folgt daraus: Vor jeder Aufnahme muß „die Entfernung eingestellt" werden, das heißt, der Abstand Objektiv–Film ist so zu justieren, daß ein scharfes Bild entsteht. Bei den meisten Kameras erfolgt die Entfernungseinstellung, indem das Objektiv in einem Gewindeansatz vor- oder zurückbewegt wird. Eine Skala zeigt die jeweils eingestellte Entfernung an.

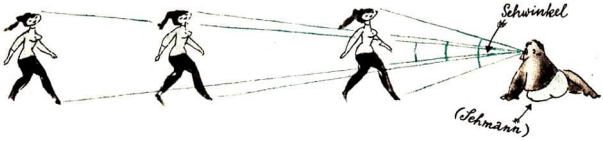
Hierbei taucht eine Schwierigkeit auf: Räumliche Gegenstände ergeben eigentlich auch ein räumliches Bild. Ein Körper kann daher, wenn wir ganz genau sind, niemals in seiner ganzen Tiefenausdehnung gestochen scharf abgebildet werden, da ein Teil der „scharfen" Bildpunkte vor der Filmebene, ein Teil dahinter liegt. Zum Glück empfindet unser Auge sehr geringfügige Unschärfen nicht. Immerhin können wir auf Fotografien feststellen, daß nur Körper innerhalb eines bestimmten räumlichen Tiefenbereichs scharf wiedergegeben werden: Ist der nächste Vordergrund gestochen scharf, so verschwimmt der Hintergrund und umgekehrt. Der Begriff der Schärfentiefe, das heißt die Festlegung des Raumbereichs, der von der Kamera so scharf abgebildet wird, daß das Auge keine Unschärfe empfindet, ist daher für die Fototechnik sehr wichtig. Diejenigen unserer Leser, die selbst fotografieren, wissen auch, wie sich die Schärfentiefe vergrößern läßt: Das Objektiv wird abgeblendet; seine Öffnung wird durch eine Blende begrenzt. Je kleiner ihre Öffnung ist, desto weiter dehnt sich der scharf abgebildete Tiefenbereich aus, desto geringer wird allerdings auch die vom Film empfangene Lichtmenge. Deshalb bedingt jede Verkleinerung der Blende eine Verlängerung der Belichtungszeit.

Bei der Untersuchung der Sammellinse haben wir wieder einmal „idealisiert" und uns nicht um störende Nebenerscheinungen gekümmert. Doch eine Ideallinse, die das eingefan-

gene Bild bis ins letzte originalgetreu wiedergibt, existiert nicht. Bereits an jedem Vergrößerungsglas können wir Abbildungsfehler beobachten: Gerade Kanten am Rande des Bildfeldes erscheinen gekrümmt; Punkte werden als kurzer Strich wiedergegeben; die dargestellten Gegenstände zeigen einen farbigen Saum. Ursache solcher und anderer Fehler ist zum Beispiel, daß Licht verschiedener Farbe auch verschieden stark gebrochen wird (vgl. S. 196) oder daß die Randpartien einer Linse eine etwas andere Brennweite aufweisen als ihr Mittelfeld. Wo es auf Originalgetreue eines optischen Bildes ankommt, sind die Abbildungsfehler möglichst zu verringern. Man kombiniert zu diesem Zweck mehrere Linsen, deren Fehler einander größtenteils (aber leider nicht völlig) aufheben. Das Objektiv einer hochwertigen Kamera oder eines anderen optischen Präzisionsgerätes besteht häufig aus vier, sechs oder noch mehr Einzellinsen.

Entwurf und Berechnung derartiger Linsensysteme, deren berühmteste seit Jahrzehnten in den Jenaer Zeisswerken gefertigt werden, zählten bis in die jüngste Zeit zu den langwierigsten physikalisch-mathematischen Arbeiten. Die Einführung elektronischer Rechenanlagen hat auch hier Wandel geschaffen und die Konstrukteure von eintöniger, ermüdender Rechenarbeit entlastet.

Ein Körper erscheint dem Auge um so größer, unter je größerem Sehwinkel wir ihn erblicken. Nähert sich etwa ein Schiff unserem Standort, so wächst es scheinbar ständig, weil bei Verkürzung des Abstandes der Sehwinkel zunimmt. Umgekehrt kommen uns entfernte Gegenstände winzig vor, weil wir sie unter sehr kleinem Sehwinkel betrachten. Über die tatsächliche Größe eines Körpers sagt der Sehwinkel allein nichts aus; daß wir trotzdem fast immer annähernd richtige Größen schätzen, liegt vor allem daran, daß wir seit unserer frühesten Kindheit „gelernt" haben, wie groß die Dinge sind. Auch hier aber ist unser Auge nicht gegen Irrtümer gefeit. Zahlreiche Filmtricks, bei denen uns ein nur meterhohes Modell als Wolkenkratzer vorgesetzt wird oder ein „Ozeanriese"



in einem Wasserbecken von Zimmergröße dahinfährt, beweisen es.

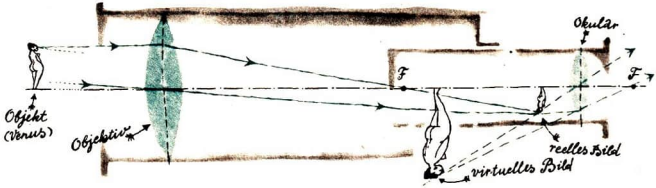
Wenden wir uns nach dieser notwendigen Abschweifung wieder den optischen Geräten zu. Wenn Sie das Bild auf der Mattscheibe einer alten Plattenkamera durch ein Vergrößerungsglas betrachten, kann es sein, daß Sie die abgebildeten Dinge unter einem größeren Sehwinkel erblicken, als wenn Sie sie unmittelbar beobachteten. Die Gegenstände erscheinen größer, sie sind (scheinbar) nähergerückt – mit anderen Worten: Fotoapparat und Vergrößerungsglas ergeben ein Fernrohr.

Bereits das von Johannes Kepler (1571 bis 1630) beschriebene astronomische Fernrohr arbeitete nach diesem Prinzip: Es enthält eine Sammellinse großer Brennweite, das dem zu beobachtendem Objekt zugewandte Objektiv, und eine Sammellinse sehr kurzer Brennweite, das dem Auge (lat. oculus) zugekehrte Okular.

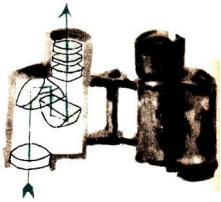
Das Objektiv entwirft, wie das Objektiv des Fotoapparates, ein verkleinertes, reelles Bild des entfernten Gegenstandes. Dieses Bild wird mit dem als Vergrößerungsglas wirkenden Okular betrachtet. Es ist dabei nicht einmal nötig, das verkleinerte Bild mit einer Mattscheibe aufzufangen, denn die Tatsache, daß sich die Lichtstrahlen hinter dem Objektiv schneiden, ist unabhängig davon, ob sich an dieser Stelle eine Mattscheibe befindet oder nicht.

Ein astronomisches Fernrohr vergrößert um so mehr, je größer das Verhältnis Objektivbrennweite zur Okularbrennweite ist. Da die Okularbrennweite sich nicht beliebig verringern läßt, muß man, sofern eine starke Vergrößerung gewünscht wird, Objektive sehr langer Brennweite einsetzen. Deshalb sind astronomische Fernrohre oft viele Meter lang.

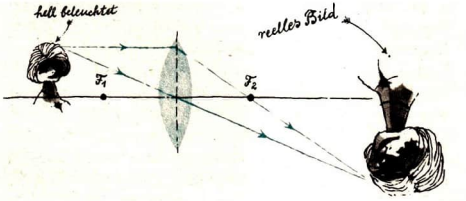
Das Bild des astronomischen Fernrohres steht Kopf. Das stört bei astronomischen Messungen wenig, doch für Beobachtungen auf der Erde wäre ein solches Fernrohr unbequem. Man kann sich helfen, indem man eine dritte Sammellinse



in den Strahlengang einschaltet, die lediglich die Aufgabe hat, das Bild aufzurichten. Allerdings bedingt das eine weitere Verlängerung des Fernrohres. Man kehrt daher heute meistens das Bild durch zwei Prismen um, an deren Flächen Totalreflexion eintritt. Das Fernrohr wird wegen des zweimal umgelenkten Strahlenganges erheblich verkürzt. Prismenfernrohre, gegen Ende des vorigen Jahrhunderts in den Zeisswerken entwickelt, sind daher heute über die ganze Welt verbreitet.



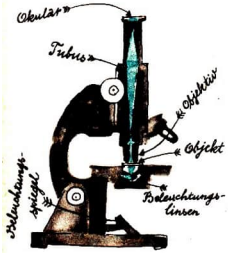
Doch wie funktioniert ein Bildwerfer? Das zu projizierende und von hinten gut beleuchtete Diapositiv wird so eingeschoben, daß es sich zwischen der einfachen und doppelten Brennweite einer Sammellinse (in der Praxis ein aus mehreren Linsen zusammengesetztes Objektiv) befindet. Es entsteht, wie die folgende Abbildung zeigt, ein reelles, vergrößertes Bild, das allerdings wieder Kopf steht. Um es aufzurichten, wird das Diapositiv um 180° gedreht.



Der Bildwerfer erzeugt ein vergrößertes Bild des kleinen Diapositivs. Würden wir dieses Bild durch ein Vergrößerungsglas betrachten, so könnten wir (sofern sich die immer etwas rauhe Oberfläche des Projektionsschirmes nicht störend bemerkbar machte) die Vergrößerung noch weiter treiben. So arbeitet das Mikroskop, ein Instrument, das wohl wie kaum ein anderes unsere Kenntnisse vom Naturgeschehen erweitert hat.

Das Mikroskop besteht in seiner einfachsten Ausführung aus zwei Sammellinsen, die in einem lichtdichten Rohr, dem Tubus des Mikroskops, angebracht sind. Die erste Sammellinse (Objektiv) erzeugt ein stark vergrößertes Bild des gut beleuchteten Objekts; mit der zweiten Sammellinse, dem als Vergrößerungsglas wirkenden Okular, wird dieses Bild betrachtet.

Das Mikroskop auf S. 192 ist allerdings komplizierter gebaut: Ein schwenkbarer Spiegel lenkt das Licht zunächst auf



Beleuchtungslinsen. Sie sammeln es und richten es so, daß ein auf dem verstellbaren Objekttisch liegendes Präparat von unten gut und gleichmäßig durchleuchtet wird. Das Objektiv – es ist, um Linsenfehler zu korrigieren, ebenso wie das Okular aus mehreren Einzellinsen zusammengesetzt – hat eine nur sehr geringe Brennweite und wird dicht an das zu untersuchende Präparat herangebracht. Damit der Vergrößerungsmaßstab rasch verändert werden kann, sind häufig mehrere Objektive verschiedener Brennweiten so in einer Drehvorrichtung (Objektivrevolver) montiert, daß sie sich mit einem Griff auswechseln lassen.

Die Entwicklung leistungsfähiger Mikroskope geht vor allem auf die Arbeiten Ernst Abbes (1840 bis 1905) und ihre Verwirklichung in den Jenaer Zeisswerken zurück. Heute gelten die Mikroskope aus den in Volkseigentum überführten Zeisswerken als die besten in der Welt.

Nicht nur das Mikroskop selbst wurde in den vergangenen Jahrzehnten ständig verbessert. Man entwickelte auch zahlreiche technische Hilfsmittel und Verfahren, die das Mikroskop besser und vielseitiger auszunutzen gestatten.

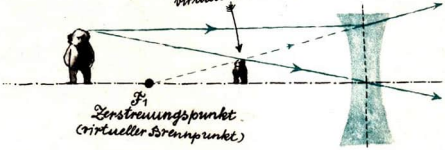
Besondere Beleuchtungseinrichtungen wurden geschaffen; die verschiedenartigsten Präpariermethoden zur Vorbereitung der zu untersuchenden Objekte wurden ausgearbeitet; Zusatzgeräte entstanden, mit denen das vom Mikroskop erzeugte Bild auf einen Schirm projiziert oder von einem Filmapparat oder einer Fernsehkamera festgehalten werden kann.

Alle diese Fortschritte konnten aber nichts daran ändern, daß der mit einem Mikroskop erreichbaren Vergrößerung Grenzen gesetzt sind. Rücken zwei Punkte eines Präparats nämlich zu dicht zusammen (auf einen Abstand von weniger als 0,0002 mm), so bildet das Mikroskop sie nicht mehr getrennt ab; es kann sie nicht mehr „auflösen". Bei derart geringen Abständen gelten nicht mehr die einfachen optischen Gesetze, mit denen wir bisher zu tun hatten: Der Lichtstrahl ist gewissermaßen zu „grob" und kann sich nicht unbeeinflußt durch die winzige Lücke hindurchzwängen. Er wird aus seiner Richtung geworfen, und mit dem Entstehen eines originalgetreuen Bildes ist es vorbei. Man kommt aus diesem Grunde mit dem Mikroskop nicht über eine etwa 2000fache Vergrößerung hinaus.

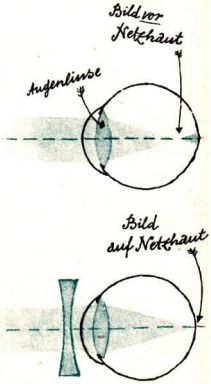
Vergrößerungen bis zum 200 000fachen und darüber erreicht man mit dem „Elektronenmikroskop". An die Stelle der Lichtstrahlen treten bei ihm „Strahlen" aus kleinsten elektrischen

Teilchen, aus sogenannten „Elektronen" (s. S. 201). Sie werden durch magnetische oder elektrische Kräfte ähnlich geführt und abgelenkt wie Lichtstrahlen durch Linsen und können daher ebenfalls vergrößerte Bilder eines durchstrahlten Objekts erzeugen.

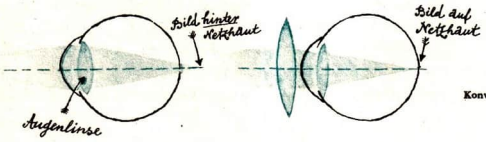
Von den Konkavlinsen haben wir bisher noch nichts gehört, obwohl sie in den aus Einzellinsen zusammengesetzten Objektiven optischer Geräte fast stets vertreten sind. Die Konkavlinse ist eine „Zerstreuungslinse". Sie lenkt parallel einfallendes Licht so ab, daß es von *einem* Punkt herzukommen scheint. Man nennt ihn Zerstreuungspunkt oder virtuellen Brennpunkt. Konkavlinsen erzeugen stets verkleinerte, virtuelle Bilder.



Besonders wichtig ist die Konkavlinse als Brillenglas zur Korrektur der Kurzsichtigkeit. Das von der Augenlinse entworfene Bild entsteht im normalen Auge auf der „Netzhaut" an der hinteren Innenwand des Augapfels. Beim kurzsichtigen Auge jedoch liegt dieses Bild ein Stückchen vor der Netzhaut, und infolgedessen sieht der Kurzsichtige unscharf. Durch eine Brille mit konkaven Gläsern läßt sich jedoch das Bild so weit nach hinten verschieben, daß es wieder genau auf die Netzhaut fällt. Beim weitsichtigen Auge entstehen die Bilder naher Gegenstände hinter der Netzhaut. Man korrigiert diesen Augenfehler durch eine Brille mit konvexen Gläsern. Sie sammeln die ankommenden Lichtstrahlen bereits vor ihrem Eintritt in die Augenlinse. Durch das Zusammenwirken von Brillenglas und Augenlinse wird erreicht, daß sich das Bild um das erforderliche Stück in Richtung zur Augenlinse verschiebt.



Konkavlinse gegen Kurzsichtigkeit



Konvexlinse gegen Weitsichtigkeit

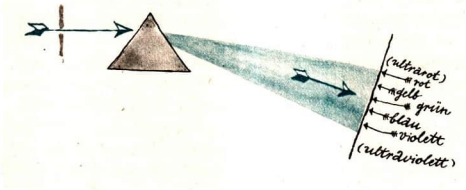
Detektiv Licht

Eine lebhafte Diskussion folgte dem Vortrag, den der bekannte Astronom vor den Hörern der Betriebsakademie gehalten hatte. Ein Zuhörer meldete Zweifel an: „Sie erwähnten, daß die Himmelskörper aus den gleichen chemischen Grundstoffen wie unsere Erde bestehen. Aber ist das nicht eine unbewiesene Annahme? Auf dem Mars oder gar auf der Sonne war ja schließlich noch niemand, der Stoffproben auf die Erde gebracht hat. Woher will man also wissen, welche Elemente es im Weltall gibt?" Der Astronom überlegt einen Augenblick, dann stellt er eine Gegenfrage: „Worauf würden Sie schließen, wenn Sie auf einem frisch geharkten Gartenweg Fußabdrücke entdeckten?" „Es ist jemand den Weg entlanggegangen." „Und wenn es sehr kleine Spuren sind?" „Dann muß dieser Jemand ein Kind gewesen sein." „Aber woher wissen Sie das? Sie haben das Kind doch weder gesehen noch angefaßt?" „Aber ich bitte Sie – die Spuren genügen doch!" „Sehen Sie, in einer ganz ähnlichen Lage sind die Wissenschaftler. Sie haben zwar noch keine Sonnenmaterie unmittelbar im Labor untersuchen können, aber die Stoffe auf der Sonne und auf anderen Himmelskörpern verraten sich ebenso durch ihre Spuren wie der Besucher Ihres Gartens." „Hm – was sind das für Spuren?" „Dem Licht, das von den Sternen zu uns kommt, können wir ‚ansehen', von welchen Stoffen es stammt."

Verlassen wir den Vortragssaal. Vielleicht sind auch Sie etwas skeptisch: Das schwache, oft kaum wahrnehmbare Licht der Sterne soll Auskunft geben, woraus sie zusammengesetzt sind? Dem einfachen, weißen Sonnenlicht soll anzusehen sein, welche chemischen Elemente wir auf der Sonne vorfinden würden?

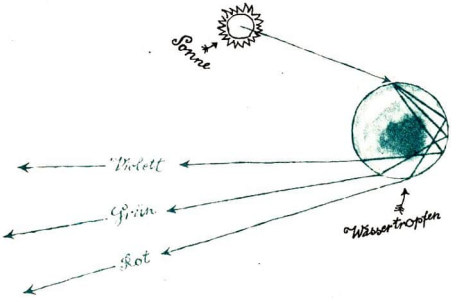
Hier sind wir schon einem Irrtum erlegen: Das Sonnenlicht ist keineswegs so „einfach", wie es uns vorkommt. Das läßt sich ohne jeden Aufwand zeigen: Fällt Sonnenlicht durch einen schmalen Spalt auf einen weißen Kartonschirm, so leuchtet dieser an der Stelle hell auf, wo er vom Licht getroffen wird. Halten wir ein dreiseitiges Glasprisma in den Strahlenweg, so wird das Sonnenlicht durch die Brechung im Prisma nicht einfach zur Seite gelenkt. Es entsteht vielmehr auf dem Schirm ein Band aus ineinander überfließenden Farben. Außer Rot und Violett, die an den Enden des Bandes erscheinen, sind Gelb, Grün und Blau deutlich zu unterscheiden. Man nennt dieses Band, dessen Farben sich stets in der

gleichen Reihenfolge zeigen und ineinander übergehen, ein kontinuierliches „Spektrum". Seine Farben heißen Spektralfarben. Wie viele es „genau" sind, läßt sich nicht angeben. Daß in den meisten Büchern sieben Spektralfarben genannt werden (es kommen zu den aufgezählten noch Orange und Indigo), hat historische Ursachen. Newton traf diese Einteilung als Parallele zu den sieben verschiedenen Grundtönen der Tonleiter.



In Wirklichkeit kann man im Spektrum nicht nur beliebig viele Farbtönungen unterscheiden, sondern es ist auch länger, als wir es sehen:
An das Violett schließt sich das Ultraviolett an. Es ist zwar für das menschliche Auge unsichtbar, wird aber von manchen Tieren, beispielsweise von Bienen, wahrgenommen. Auch ist das ultraviolette Licht für die Bräunung unserer Haut im Sonnenschein und für andere biologische Vorgänge verantwortlich.
Am „roten Ende" des Spektrums treffen wir auf das gleichfalls unsichtbare „Ultrarot" oder „Infrarot" (vgl. S. 130). Seine bekannteste optische Eigenschaft ist, daß es in der Atmosphäre weit weniger zerstreut und geschwächt wird als sichtbares Licht. Die „Ultrarotfotografie", die mit ultrarotempfindlichen Filmen arbeitet, ist daher vor allem für Fernaufnahmen geeignet. Sie ist ein ausgezeichnetes Hilfsmittel der Forschung, wurde aber in den vergangenen Jahren von den imperialistischen Staaten des öfteren für Spionagezwecke mißbraucht.
Die Zerlegung des Lichtes, die „Dispersion", zeigt uns: Das Weiß des Sonnenlichtes ist keine einfache Farbe, sondern eine Mischung der Spektralfarben. Das läßt sich auch „andersherum" zeigen: Bringen wir eine Konvexlinse zwischen Prisma und Kartonschirm an, so sammelt sie die Spektralfarben wieder. Auf dem Schirm zeichnet sich bei entsprechender Distanz von der Linse ein weißer Lichtfleck ab.

Wie es überhaupt zur Farbenzerlegung kommt, erfahren wir wieder auf der Rodelbahn. Da, sehen Sie: Der Knirps im violetten Pullover, der eben die Bahn herabgesaust kommt, stemmt in voller Fahrt einen Fuß in den Schnee; schon macht sein Schlitten eine scharfe Wendung und gleitet in der neuen Richtung weiter. Und jetzt, der Junge im roten Anorak: Er hat, um einem Baumstumpf auszuweichen, seinen Fuß nur ganz leicht in den Schnee gedrückt, und mit einer geringfügigen Richtungsänderung flitzt er am Hindernis vorbei.
Tritt Licht aus dem leeren Raum oder aus Luft in einen optisch dichteren Stoff ein, so ändert sich, wie wir wissen, seine Geschwindigkeit. Doch diese Änderung wirkt sich nicht auf alle Farben gleich aus: Der violette Anteil des Sonnenlichtes bewegt sich im Glas etwas langsamer, er wird mehr abgebremst als das rote Licht. Infolgedessen wird das violette Licht beim Passieren des Prismas stärker „herumgerissen" als das rote, dessen Geschwindigkeit sich nur geringfügig verändert.
Kennen Sie die Spektralfarben nicht auch unter einem anderen Namen? „Regenbogenfarben" nennt man sie im Alltag. Auch der Regenbogen entsteht nämlich durch Dispersion: In den ungezählten Regentropfen wird das Sonnenlicht in unser Auge reflektiert und außerdem in Spektralfarben zerlegt.



Müßte sich die Dispersion nicht auch bei der Lichtbrechung in einer Linse bemerkbar machen? Dies ist in der Tat der Fall, und wir haben es sogar bereits erwähnt: Die farbigen Säume, die uns beim Blick durch ein Vergrößerungsglas oft

auffallen, entstehen durch die Dispersion. In optischen Präzisionsgeräten, zu denen auch der Fotoapparat zählt, würden sie sehr stören. Es gibt jedoch seit langem „achromatische" Objektive, aus Linsen verschiedener Glassorten zusammengesetzt, deren Dispersion kompensiert ist.

Jeder weißglühende Körper sendet Licht aus, das ebenso wie das Sonnenlicht in ein Spektrum kontinuierlich ineinander übergehender Farben zerlegt werden kann. Die Spektren leuchtender Gase bestehen dagegen nur aus einzelnen farbigen Linien. Dabei hat jedes chemische Element ein anderes typisches Linienspektrum. Es ist durch Zahl, Farbe und Anordnung der Spektrallinien eindeutig gekennzeichnet; und es spielt keine Rolle, ob der betreffende Grundstoff rein, in einer Verbindung oder zusammen mit anderen Grundstoffen auftritt. Robert Bunsen (1811 bis 1899) und Robert Kirchhoff (1824 bis 1887), die diese Gesetzmäßigkeit erkannten, entwickelten aus ihr die „Spektralanalyse", eines der wichtigsten physikalisch-chemischen Nachweisverfahren.

Das Spektrum dampfförmigen Natriums zum Beispiel ist eine intensiv leuchtende gelbe Linie (bei starker Vergrößerung erkennt man allerdings zwei sehr dicht nebeneinanderliegende Linien). Will man feststellen, ob in irgendeinem unbekannten Stoff Natrium enthalten ist, so erhitzt man eine Materialprobe so sehr, daß sie verdampft und glüht. Sobald im erhaltenen Spektrum die „Natriumlinie" auftaucht, weiß man mit Sicherheit, daß der betreffende Stoff Natrium enthält. Mit allen anderen Grundstoffen kann man ebenso verfahren. Ihre Spektren wurden untersucht, genau ausgemessen und katalogisiert; wo immer sie auftreten, kann man mit Sicherheit auf das Vorhandensein des betreffenden chemischen Grundstoffes schließen.

Besonders wertvoll ist die Spektralanalyse, weil bereits winzige Stoffmengen genügen, ein Spektrum zu erzeugen. Stoffspuren, die sich jeder Wägung entziehen, können durch ihr Spektrum leicht nachgewiesen werden. Kein Legierungsbestandteil, keine Verunreinigung eines Werkstoffes bleibt der spektralanalytischen Untersuchung verborgen. Kriminalisten weisen mit Hilfe der Spektralanalyse Giftspuren nach, die ein Chemiker mit den „üblichen" Methoden niemals finden könnte. Einige Banknotenfälscher, die sich ganz sicher glaubten, wurden durch die Spektralanalyse überführt: Sie hatte offenbart, daß die zum Nachdruck verwendete Farbe sich um eine winzige Kleinigkeit von der Originalfarbe unterschied.

„Spektrometer" oder „Spektrographen" heißen die Geräte, mit denen man Spektraluntersuchungen durchführt. Die zu untersuchende Stoffprobe wird im Bunsenbrenner, im Lichtbogen oder durch elektrische Funken verdampft. Das Licht des glühenden Dampfes fällt durch einen schmalen Spalt und eine Sammellinse auf das zerlegende Prisma. Das entstehende Spektrum wird durch eine weitere Linse „auseinandergezogen" und vom Wissenschaftler durch ein Vergrößerungsglas beobachtet. Man nennt es, da es durch Lichtaussendung entsteht, „Emissionsspektrum".

Meistens ist noch ein „Skalenrohr" vorgesehen. Mit seiner Hilfe blendet man eine Meßskala in das Spektrum ein und erleichtert damit die Auswertung. Tritt an die Stelle des beobachtenden Auges eine Kamera, so wird das Spektrometer zum Spektrographen, der dauerhafte Spektralbilder liefert.

Kombiniert man einen Spektrographen mit einem astronomischen Fernrohr, so kann man die Spektren von Sternen untersuchen. Damit wäre die Frage aus dem ersten Absatz dieses Kapitels beantwortet – wenn nicht eine Schwierigkeit auftauchte: Um Elemente festzustellen, brauchen wir ein Linienspektrum; die Sonne zum Beispiel aber erzeugt ein kontinuierliches Spektrum, wenn wir ihr Licht durch ein Prisma zerlegen.

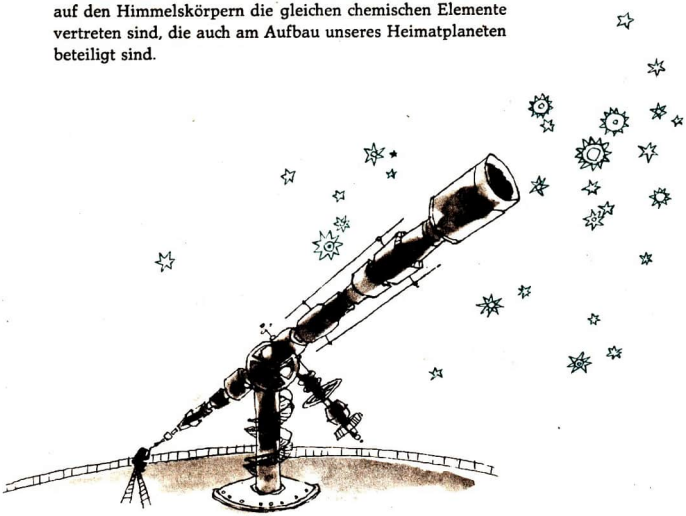
Man könnte mit diesem Spektrum nicht allzuviel anfangen, wenn man nicht schon in den ersten Jahren des 19. Jahrhunderts etwas Merkwürdiges beobachtet hätte: Als man durch geeignete optische Hilfsmittel das Sonnenspektrum weit auseinanderzog, entdeckte man zahlreiche dunkle Linien, die das kontinuierliche Farbband unterbrachen. Zur Erinnerung an Joseph Fraunhofer (1787 bis 1826), der diese Linien untersuchte, nennt man sie Fraunhofersche Linien. Sie verdanken ihre Existenz einem weiteren wichtigen Naturgesetz: Gase absorbieren Licht der Farben, die sie selbst in leuchtendem Zustand aussenden.

Lassen wir zum Beispiel Sonnenlicht durch Natriumdampf auf ein Prisma fallen, so zeigt das Spektrum genau an der Stelle eine Lücke, an die eigentlich die „Natriumlinie" gehört. Bei Dämpfen eines anderen Grundstoffes lägen die Lücken dort, wo sonst die Spektrallinien des betreffenden Stoffes zu finden wären. Man nennt ein derartiges Spektrum „Absorptionsspektrum".

Damit finden die Fraunhoferschen Linien ihre Erklärung: Die äußeren Teile der Gashülle der Sonne absorbieren *die* Spektrallinien des aus dem Sonneninneren kommenden Lichtes, die den in der Gashülle enthaltenen chemischen Grundstoffen entsprechen. Durch Ausmessung der Fraunhoferschen Linien konnte man bereits über 60 chemische Elemente auf der Sonne nachweisen.

Das Edelgas Helium wurde durch sein Spektrum sogar zuerst auf der Sonne entdeckt und später auf der Erde gefunden.

Auch über den Aufbau der Fixsterne und der Gasnebel erhält man durch spektroskopische Untersuchungen wertvolle Aufschlüsse. Dabei hat es sich immer wieder gezeigt, daß auf den Himmelskörpern die gleichen chemischen Elemente vertreten sind, die auch am Aufbau unseres Heimatplaneten beteiligt sind.



Elektronen unterwegs

Wir kippen den Knebel eines Schalters. Licht flammt auf; ein Motor läuft an; ein Akkumulator wird geladen. Wer könnte nicht hundert Anwendungen des elektrischen Stromes aufzählen? Doch ein so vielseitiger Helfer die Elektrizität auch ist – sie selbst bleibt uns verborgen; denn kein menschliches Sinnesorgan spricht unmittelbar auf sie an. Stets ist der elektrische Strom nur an seinen Wirkungen zu erkennen.
„Strom fließt": Diese Ausdrucksweise entstand nicht von ungefähr. Als man begann, sich intensiv mit der Elektrizität zu beschäftigen, stieß man sehr bald auf Erscheinungen, die sich nur durch die Annahme eines Strömens der Elektrizität, durch die Annahme fließender elektrischer Substanzen erklären ließen. Jahrzehnte angestrengter Forschungstätigkeit waren nötig, um diese Annahme Gewißheit werden zu lassen.
Seit der Zeit um die Jahrhundertwende weiß man: Der elektrische Strom in unseren Leitungen und Geräten besteht aus „Elektronen". Sie strömen zwischen den Atomen, aus denen der Draht besteht.
Elektronen sind winzige Materieteilchen, die elektrische Eigenschaften besitzen, die „eine elektrische Ladung tragen". Sie gehören zu den elementaren Bausteinen der Welt. Jedes Atom enthält – wenigstens normalerweise – Elektronen. Sie umkreisen, ähnlich wie Planeten die Sonne, auf ganz bestimmten Bahnen den Atomkern, sind für die chemischen Eigenschaften der Elemente und auch für das Entstehen von Licht verantwortlich.
Auch im Atomkern gibt es elektrisch geladene Teilchen, die sogenannten „Protonen".
Elektronen und Protonen verhalten sich in elektrischer Hinsicht entgegengesetzt und ziehen einander an. Deshalb bezeichnet man die Elektronen als negativ elektrisch (−), die Protonen als positiv elektrisch (+).

Den Elektrotechniker interessieren vor allem die Elektronen; denn während die Protonen Bestandteile des Atomkerns sind und nur frei werden, wenn man diesen zertrümmert, lassen sich Elektronen leicht aus Atomen oder Molekülen abtrennen oder auch zusätzlich in diese einfügen.

Elektronen, die sich von den Atomen getrennt haben, sind nicht nur der „Rohstoff" der Elektrotechnik, sondern auch der Elektronik, jener technischen Disziplin, ohne die es keinen Rundfunk, keinen Tonfilm, kein Fernsehen, keine elektronische Rechenmaschine, keine Steuer- und Regeltechnik, kein Radar und keine Raumschiffahrt gäbe.

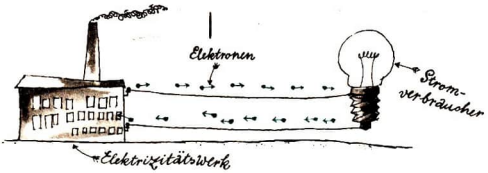
Doch bleiben wir bei den Elektronen, die als elektrischer Strom durch die Anschlußdrähte von Lampen, Bügeleisen und Ventilatoren, durch Hochspannungsleitungen und Erdkabel wandern.

Die Wirkungen eines elektrischen Stromes sind um so stärker, je mehr Elektronen an ihm beteiligt sind oder, genauer ausgedrückt, je mehr Elektronen in einer vereinbarten Zeit – etwa in einer Sekunde – eine bestimmte Stelle des Drahtes passieren oder in ein elektrisches Gerät eintreten. Die „Stromstärke" ist daher eine sehr wichtige Grundgröße der Elektrotechnik. Man könnte sie in „Elektronen je Sekunde" angeben, doch das wäre ebenso unpraktisch, als wollte man die Abflußmenge eines Wasserlaufs in Tröpfchen je Sekunde messen. Ein Elektron trägt nur eine winzige Elektrizitätsmenge, und selbst an schwächsten Strömen sind sehr viele Elektronen beteiligt. Daher bestimmt man die Stärke eines Stromes nicht durch Abzählen seiner Elektronen (was auch gar nicht unmittelbar durchführbar wäre), sondern durch Beobachten seiner Wirkungen, zum Beispiel, indem man ihn bestimmte chemische oder magnetische Erscheinungen hervorrufen läßt.

Einheit der Stromstärke ist das Ampere (A), so benannt nach dem französischen Physiker André Marie Ampère (1775 bis 1836).

Fließt durch ein elektrisches Gerät ein Strom von der Stärke 1 A, so treten in dieses Gerät in jeder Sekunde nicht weniger als 6,25 Trillionen Elektronen ein. Durch eine 100-W-Lampe für 220 Volt fließt ein Strom von etwa 0,5 A. Mehr als 3 Trillionen Elektronen müssen dem Leuchtdraht dieser Lampe in der Sekunde zugeführt werden. Andere Geräte und Anlagen brauchen weit stärkere Ströme: Bereits ein Heizöfchen bringt es auf 6 oder 7 A; der Motor eines Straßenbahnwagens verlangt Stromstärken um 150 A; bei vielen Produktions-

prozessen (Aluminiumgewinnung, Karbiderzeugung usf.) treten Stromstärken von mehr als 100 000 A auf.
Unwillkürlich fragt man sich, wo die gewaltigen Elektronenmengen herkommen, die solche Ströme hervorrufen. Sie sind als „Leitungselektronen" in jedem Draht, in jedem Metall enthalten. Es sind Elektronen, die von den Atomen des Drahtes abgegeben wurden und sich verhältnismäßig frei zwischen den Atomen bewegen können. Strom. und zwar sogenannter Gleichstrom, fließt, wenn sie in gleicher Richtung durch den Draht wandern.
Daß der Vorrat eines Drahtes an Leitungselektronen sich nicht durch den Stromfluß erschöpft, liegt daran, daß ein dauernder elektrischer Strom nur in einem geschlossenen Kreislauf, in einem „Stromkreis", fließt. Es ist ähnlich wie bei einer Warmwasserheizung (vgl. S. 130), in der ständig dasselbe Wasser umläuft.
Im elektrischen Stromkreis fließen dem „Stromverbraucher" durch den einen Anschlußdraht ständig Elektronen zu, während ihn durch den zweiten Anschlußdraht ebenso viele Elektronen verlassen. Damit wissen wir nun auch, warum jedes elektrische Gerät *zwei* Anschlußdrähte braucht: Einer dient der Elektronenhinleitung, der andere der Elektronenrückführung. Die allgemein übliche Bezeichnung „Stromverbraucher" stimmt also gar nicht! Es werden keine Elektronen verbraucht; sie durchfließen lediglich die elektrischen Geräte und geben dabei Energie ab.
Der Kreislauf schließt sich im Elektrizitätswerk. Dort arbeiten die Generatoren, die „Stromerzeuger". Doch sie erzeugen nicht etwa Elektronen, sondern sind fast so etwas wie Pumpen, die die bereits vorhandenen Elektronen in Bewegung halten.
Die Wanderungsgeschwindigkeit der Elektronen im Draht ist sehr gering. Sie kommen in der Sekunde nur um Bruchteile eines Millimeters voran. Daß trotzdem Strom fließt, sobald wir einen Schalter betätigen, erklärt sich daraus, daß



der „Stoß", den die Elektronen dadurch erhalten, sich blitzschnell durch den Draht fortpflanzt. Es ist fast wie bei einem Eisenbahnzug: Obwohl er langsam anfährt, pflanzt sich der Beginn der Bewegung von der Lokomotive aus sehr schnell durch den ganzen Zug fort. Sämtliche Wagen beginnen ihre Fahrt beinahe gleichzeitig.

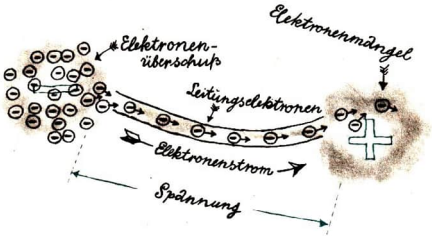
Durch feste Stoffe fließt elektrischer Strom nur, wenn es in ihnen genügend viele Leitungselektronen gibt. Solche Stoffe – ihre wichtigsten Vertreter sind die Metalle – heißen „Leiter". In Materialien ohne Leitungselektronen kann kein Strom fließen. Man nennt sie „Isolatoren". Leiter und Isolatoren sind für die Elektrotechnik unentbehrlich. Jene sollen dem Strom möglichst bequeme Wege schaffen; diese sollen verhindern, daß er von den ihm vorgeschriebenen Wegen abweicht.

Eine scharfe Grenze zwischen Leitern und Isolatoren gibt es nicht. Durch keinen Stoff können sich Elektronen völlig ungehindert bewegen (vgl. S. 207), und man kennt keinen Isolator, der nicht doch einige „bewegliche" Elektronen enthielte.

Eine dritte Gruppe läßt sich weder den Leitern noch den Isolatoren zuzählen. Diese Stoffe nehmen eine Zwischenstellung ein, die sich auch in ihrem Namen, „Halbleiter", ausdrückt. Lange beschränkte sich der Anwendungsbereich der Halbleiter, in denen sich die Elektronen nach recht komplizierten Gesetzen bewegen, auf wenige Spezialaufgaben. In den letzten beiden Jahrzehnten jedoch eröffnete gerade die Halbleitertechnik ganz neuartige Möglichkeiten für den Bau leichterer, kleinerer und leistungsfähigerer elektronischer Geräte. Das große Halbleiterwerk unserer Republik in Frankfurt an der Oder beweist, welche Bedeutung den Halbleitern auch für unsere Volkswirtschaft zukommt.

Die drei Unzertrennlichen

Ein Wasserlauf braucht Gefälle. Auch Elektronen können sich nicht von allein durch den Stromkreis bewegen und dabei noch in elektrischen Geräten Arbeit verrichten; denn das widerspräche dem Satz von der Erhaltung der Energie. Wo aber ist das „Gefälle" der Elektronen? Wer treibt sie an? Die Elektronenbewegung entsteht dadurch, daß Atome und die aus ihnen zusammengesetzten Körper bestrebt sind, fehlende Elektronen zu ergänzen oder überschüssige Elektronen abzugeben.

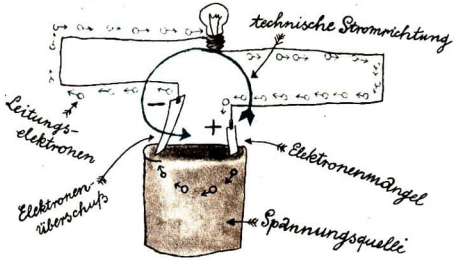


In unserer Abbildung besitzt der linke Körper einen Elektronenüberschuß; er ist „negativ elektrisch geladen". Dem rechten Körper dagegen fehlen Elektronen; daher überwiegen die in seinen Atomen enthaltenen positiven Ladungen. Der Körper ist „positiv elektrisch geladen". Beide Körper versuchen, ihre Ladungen auszugleichen. Dieses Bestreben nennt man elektrische „Spannung". Damit sie sich auswirken kann, müssen wir einen Weg für den Ladungsausgleich schaffen. Verbinden wir beide Körper durch einen Draht, so treten infolge der Spannung aus dem Überschußgebiet Elektronen in den Draht, während aus dem anderen Drahtende Elektronen in den positiv elektrischen Körper übergehen. Im Draht fließt elektrischer Strom. Sobald Überschuß und Mangel einander ausgeglichen haben, ist der Vorgang beendet. Strom und Spannung verschwinden. Die Spannung ist also die Ursache des elektrischen Stromes. Er kann nur fließen, wenn eine Spannung die Elektronen antreibt.

Den Elektrotechnikern würde die eben beschriebene Versuchsanordnung allerdings wenig nützen; denn sie brauchen Ströme, die dauernd fließen. Um diese zu erhalten, muß man trotz des ausgleichenden Stromflusses den Ladungsunterschied und damit die Spannung aufrechterhalten. Das könnte etwa geschehen, indem man mit einer „Elektronenpumpe" aus dem rechten Körper dauernd Elektronen absaugte und auf den linken Körper drückte.

Solche Elektronenpumpen gibt es. Sie heißen Spannungsquellen (werden nicht ganz richtig oft auch als „Stromquellen" bezeichnet), und zu ihnen zählen sämtliche Generatoren, Batterien, Lichtmaschinen. Ihre Wirkung ist im nächsten Bild noch einmal schematisch dargestellt: In einem Anschluß der Spannungsquelle – ihrem „negativen Pol" – herrscht stets ein Elektronenüberschuß, im anderen – dem „positiven Pol" – dagegen Elektronenmangel. Der negative Pol „drückt" Elektronen in den Draht, der positive Pol „saugt" Elektronen aus

dem Draht. In der Spannungsquelle werden dauernd Elektronen vom positiven zum negativen Pol transportiert. Es kann also zu keinem Ausgleich kommen, und ständig wandern Elektronen durch den Stromkreis.



Damit die Spannungsquelle „pumpen" kann, muß ihr Energie zugeführt werden. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten: Generatoren, unsere leistungsfähigsten Spannungsquellen, werden durch mechanische Kräfte angetrieben. In den Batterien und Akkumulatoren wird die Energie durch chemische Vorgänge freigesetzt; und in bescheidenem Umfange gelingt es auch, Wärmeenergie und Lichtenergie unmittelbar in elektrische Energie umzuwandeln.

Einheit der elektrischen Spannung ist das Volt (V), dessen Name an den italienischen Physiker Alessandro Volta (1745 bis 1827) erinnern soll. Die Spannung der Lichtleitungen beträgt meistens 220 V, die des „Kraftstromes" für kleinere Motoren 380 V; Taschenlampenbatterien weisen eine Spannung von 3 bis 4 V auf; Hochspannungs-Fernleitungen arbeiten mit Spannungen bis 400 000 V.

Elektronen bewegen sich immer dorthin, wo Elektronenmangel besteht. Der Elektronenstrom fließt „von minus nach plus". Die „technische Stromrichtung" allerdings hat man ge-

rade entgegengesetzt (von + nach −) festgelegt. Das geschah zu einer Zeit, da man von den tatsächlichen Vorgängen bei der Elektrizitätsleitung noch nichts wußte. Auch später verzichtete man auf eine Richtigstellung. Weil man alle Regeln und Gesetze der Elektrotechnik auf diese „technische Stromrichtung" bezogen hatte, wäre es nur zu Verwirrungen und Verwechslungen gekommen. Ihnen gegenüber wiegt der kleine „Schönheitsfehler" gering, daß wir heute sorgfältig zwischen „Bewegungsrichtung der Elektronen" und „technischer Stromrichtung" unterscheiden müssen.

Die Bewegung der Leitungselektronen verläuft nicht völlig ungehindert. Sie haben im Leiter einen gewissen „Widerstand" zu überwinden, der den Strom zu schwächen sucht. Wir können uns in erster Näherung vorstellen, daß dieser Widerstand durch die Reibung hervorgerufen wird, die die Elektronen zu überwinden haben, wenn sie sich zwischen den Atomen des Drahtes bewegen (die tatsächlichen Vorgänge sind allerdings weitaus komplizierter).

Im Widerstand lernen wir die dritte elektrische Grundgröße kennen. Man mißt den Widerstand in „Ohm" (Ω) und ehrt damit Georg Simon Ohm (1787 bis 1854), der sich um die Aufdeckung elektrischer Grundgesetze sehr verdient gemacht hat.

Der Widerstand eines Leiters hängt von mehreren Umständen ab: Zunächst ist er um so größer, je länger der Leiter ist. Doppelte Drahtlänge bedeutet doppelten Widerstand. Außerdem wirkt sich der Drahtdurchmesser aus: Je dicker ein Leiter ist, desto leichter fällt es den Elektronen, ihn zu passieren. Deshalb müssen da, wo starke Ströme fließen sollen, Leitungen großen Querschnitts verwendet werden.

Vor allem aber kommt es auf das Material des Leiters an: Ein Kupferdraht besitzt einen weit geringeren Widerstand als ein Aluminiumdraht gleicher Abmessungen, der Aluminiumdraht wiederum leitet den Strom besser als ein Eisendraht. Man drückt diese Materialabhängigkeit des Widerstandes durch Angabe des „spezifischen Widerstandes" aus. Er wurde für die verschiedenen Stoffe gemessen und in Tabellen niedergelegt.

Der spezifische Widerstand ist für den Elektrotechniker ebenso bedeutungsvoll wie die Wichte für den Maschinenbauer: Soll eine Leitung gezogen werden, so entscheidet der spezifische Widerstand über Material, Drahtdurchmesser, Betriebsverluste und Kosten. Soll in elektrischen Geräten anstelle des knappen Kupfers Aluminiumdraht benutzt werden,

so liefert der spezifische Widerstand den „Umrechnungskurs". Sollen Motoren oder Generatoren konstruiert werden, ist die Installation eines Wohnblocks zu entwerfen: Stets taucht der spezifische Widerstand in den Berechnungen auf.

Spannung, Stromstärke und Widerstand sind nicht voneinander unabhängig. Nimmt in einem Stromkreis der Widerstand zu, so wird die Elektronenbewegung stärker behindert als vorher. Die Stromstärke sinkt. Um sie wieder auf ihren alten Wert zu bringen, muß man die Spannung erhöhen und dadurch den Elektronen einen stärkeren Antrieb geben. So wirkt sich jede Änderung einer Grundgröße auf die beiden anderen aus. Das Verdienst, das erkannt und klar ausgesprochen zu haben, gebührt Georg Simon Ohm. Sein „Ohmsches Gesetz" zählt zu den elementarsten, aber gleichzeitig wichtigsten Beziehungen der Elektrotechnik. Es lautet:

$$\mathcal{J} = \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{R}}$$

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}$$

Bei der Formel verwenden wir die üblichen Abkürzungen I, U und R, wobei die Stromstärke in A, die Spannung in V und der Widerstand in Ω einzusetzen ist. Sind zwei Größen in der Formel bekannt, so läßt sich die dritte sofort errechnen. Dies sei an zwei Beispielen vorgeführt:

Der Widerstand einer Glühlampe betrage im Betrieb etwa 485 Ω, die Betriebsspannung 220 V. Welcher Strom durchfließt die Lampe?

$$\mathcal{J} = \frac{220}{485} = 0{,}454[A]$$

Durch einen Tauchsieder fließe bei einer Netzspannung von 220 V ein Strom von 2 A. Wie groß ist der Widerstand des Tauchsieders? (Hier müssen wir das Ohmsche Gesetz umstellen).

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{J}}$$

$$\mathcal{R} = \frac{220}{2} = 110[\Omega]$$

Wer sich – sei es beruflich oder während der Freizeit – mit Elektrotechnik beschäftigt, wird täglich mit solchen und ähnlichen Aufgaben in Berührung kommen. Es ist durchaus nicht übertrieben, wenn man bisweilen sagt, daß ein Elektrotechniker zwar notfalls ohne Schraubenzieher, niemals jedoch ohne das Ohmsche Gesetz auskomme.

Der elektrische Strom verrichtet Arbeit, ganz gleich, ob er mit dem Tauchsieder Wasser erhitzt, die Welle eines Motors dreht oder eine Glühlampe erstrahlen läßt. Sein Arbeitsvermögen bekommt er durch die Spannungsquelle. Da das Gesetz von der Erhaltung der Energie auch im Bereich der Elektrizität gilt, muß der Spannungsquelle ein der Stromarbeit entsprechender Energiebetrag zugeführt werden.

Elektroenergie wird heute vor allem in Generatoren (vgl. S. 231) gewonnen. Sie werden durch Turbinen, also durch mechanische Kräfte, angetrieben. Doch wie lassen sich die aus der Mechanik geläufigen Begriffe Leistung und Arbeit durch spezifisch elektrische Begriffe und Größen ausdrücken?

Die elektrische Leistung macht es uns besonders leicht: Sie ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke.

$$\mathcal{N} = \mathcal{U} \cdot \mathcal{I} \; [\mathcal{V}\mathcal{A}]$$

Statt „Voltampere" ist allgemein die Bezeichnung „Watt" üblich, während „Voltampere" nur in bestimmten Fällen angewandt wird.

Durchfließt zum Beispiel ein Strom von 2 A bei einer Betriebsspannung von 6 V eine Glühlampe, so beträgt die in ihr umgesetzte Leistung 12 W.

$$\mathcal{N} = 6 \cdot 2 = 12 [\mathcal{W}]$$

1000 W nennt man 1 kW („Kilowatt"), und da selbst diese Einheit für die Energiewirtschaft zu klein ist, führte man noch das „Megawatt" (MW) ein. Es ist:

$$1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW} = 1\,000\,000 \text{ W}.$$

Im Laufe des Siebenjahrplanes wird die Leistung unserer Kraftwerke um 6500 MW steigen; mit dieser Leistung könnte man 65 Millionen 100-W-Birnen betreiben!

Das Verhältnis zwischen mechanischen und elektrischen Leistungseinheiten haben wir bereits genannt (vgl. S. 81):

1 kW entspricht 1,36 PS bzw. 102 kpm/s.

Da ganz allgemein Leistung das Verhältnis aus Arbeit und dazu nötiger Zeit ist, läßt sich die Arbeit auch als Produkt aus Leistung und Zeit ausdrücken.

$$\mathcal{N} = \frac{\mathcal{A}}{t}$$

$$\mathcal{A} = \mathcal{N} \cdot t$$

In der Elektrotechnik wird die Leistung in W (bzw. kW) und die Betriebsdauer eines Gerätes zweckmäßig in Stunden gemessen.

$$\mathcal{A} = \mathcal{N} \cdot t \; [\mathcal{W} \cdot h]$$

oder:

$$\mathcal{A} = \mathcal{N} \cdot t \; [k\mathcal{W} \cdot h]$$

So ergeben sich zwanglos die bekannten elektrischen Arbeitseinheiten „Wattstunde" (Wh) und „Kilowattstunde" (kWh), zwischen denen natürlich die Beziehung 1 kWh = 1000 Wh besteht.

Daß 1 kWh der Arbeit von 367 000 kpm entspricht, wissen wir bereits (vgl. S. 78).

Brennt eine 60-W-Lampe 20 Stunden, so ergibt das eine elektrische Arbeit von 1,2 kWh.

$$\mathcal{A} = 60 \cdot 20 = 1200 [\mathcal{W}h] = 1{,}2 [k\mathcal{W}h]$$

Da auf allen elektrischen Geräten die Leistung angegeben ist, lassen sich bei bekannter Betriebsdauer die aufgewendete elektrische Arbeit und auch die Stromkosten berechnen, die für diese Arbeit zu zahlen sind.

Wärme aus der Steckdose

Etwa 150 Jahre sind vergangen, seit man entdeckte, daß ein dünner Draht zu glühen beginnt, wenn man ihn mit den Polen einer Spannungsquelle verbindet. Die Erforschung und Ausnutzung der Beobachtung, daß der elektrische Strom Wärmewirkungen hervorruft, führte zur Entwicklung eines sehr vielseitigen und sehr verbreiteten Anwendungsgebietes der Elektrizität. Es ist die Elektrowärme, die wir von früh bis spät benutzen.

Sehen Sie sich nur einmal in Ihrer Wohnung um! Da steht ein Heizöfchen, das wir an kühlen Herbst- oder Frühlingsabenden gern für kurze Zeit einschalten. Hinter seinem Schutzgitter sind Heizspiralen angebracht, die durch den elektrischen Strom zum Glühen gebracht werden. Ähnliche „Heizleiter" sind es auch, die den Elektroherd, eine Kochplatte, die Backhaube und Grillgeräte auf ihre Arbeitstemperatur bringen.

Im Brotröster dagegen treten an die Stelle der Heizspiralen häufig kurze Silitstäbe (Silit ist ein Werkstoff, der vor allem Siliziumkarbid enthält), die vom Strom durchflossen werden und hell aufglühen.

Heizleiter finden wir auch im elektrischen Bügeleisen, im Tauchsieder, in der elektrischen Kaffeemaschine, im Heißwasserspeicher oder im Durchlauferhitzer, in der Heizpatrone des Kühlschranks (vgl. S. 166), im Heizkissen und in der elektrischen Aquarienheizung.

In Industriebetrieben, in der Landwirtschaft und im Verkehrswesen haben Elektrowärmeanlagen ebenfalls seit langem Einzug gehalten: Klimaanlagen in Betrieben, Verwaltungsgebäuden oder transkontinentalen Schnellzügen wärmen die Räume mit Heizspiralen, durch die ein Luftstrom geblasen wird. Auf ähnliche Weise wird die Warmluft für Getreidetrocknungs- und Heubelüftungsanlagen gewonnen.

Chemische Bäder werden durch elektrische Heizkörper angewärmt und außerdem durch selbsttätige Regeleinrichtungen immer auf der gleichen Temperatur gehalten. Härte- und Schmelzöfen werden häufig mit Silitstäben geheizt.

In Gewächshäusern verlegt man Heizkabel im Boden, um das Pflanzenwachstum zu fördern. „Im großen" befreit dieses Verfahren die Rollfelder der Flughäfen oder die Weichen der Rangierbahnhöfe von Schnee und Eis.

Trockenpressen und Pressen zur Verformung von Plastikmaterialien sind mit elektrischer Heizung ausgestattet. Löt-

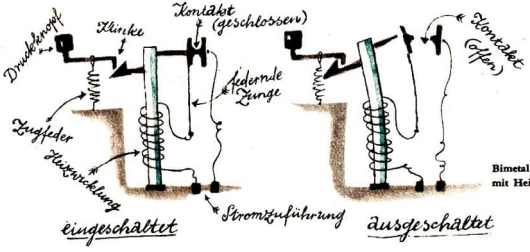
kolben werden durch eine elektrische Heizpatrone erwärmt, und beim „Widerstandsschweißen" wird der Werkstoff durch den hindurchfließenden starken Strom erhitzt, bis das Metall an den Verbindungsstellen schmilzt.

Wir könnten diese Aufzählung noch über einige Seiten fortsetzen, doch wir wollen auf zwei Anwendungen der Wärmewirkung des Stromes näher eingehen, die für Betrieb und Haushalt gleich bedeutsam sind. Die erste dieser Anwendungen führt ein recht bescheidenes Dasein; dabei bewahrt gerade sie uns vor Gefahren, die durch Schäden oder durch Überlastung elektrischer Leitungen und Geräte entstehen könnten. Es ist die Schmelzsicherung, die nicht nur am Elektrizitätszähler, sondern auch in vielen elektrischen Geräten Wächterdienste versieht.

Die Arbeitsweise einer Schmelzsicherung ist sehr einfach: Der Strom des „abzusichernden" Stromkreises durchfließt einen dünnen Draht. Material und Durchmesser werden so ausgewählt, daß der Draht bei einer bestimmten Stromstärke schmilzt und dadurch den Stromkreis unterbricht. Natürlich kann eine Sicherung ihre Aufgabe nicht mehr erfüllen, wenn sie „geflickt" wird, das heißt, wenn der richtig bemessene Sicherungsdraht behelfsmäßig durch einen anderen Leiter ersetzt wird.

Die Sicherungsdrähte müssen so angeordnet werden, daß sie beim Durchschmelzen keinen Brand verursachen können. In den Sicherungen, die wir für die Lichtleitungen unserer Wohnungen benutzen, ist daher der Sicherungsdraht in Sand eingebettet; in Sicherungen für Rundfunkempfänger und Fernsehgeräte wird er durch ein Glasröhrchen umhüllt.

Schmelzsicherungen sind unbrauchbar, nachdem sie den Strom einmal unterbrochen haben. Es gibt jedoch auch Sicherungen, die beliebig oft zu verwenden sind. Versieht man



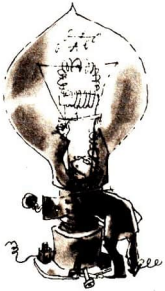
Bimetallstreifen mit Heizwicklung als Sicherung

zum Beispiel einen Bimetallstreifen mit einer vom Strom durchflossenen Heizwicklung, so erwärmt er sich und schaltet bei einer bestimmten Stromstärke den Stromkreis aus. Eine federnde Klinke hält den Streifen fest. Sobald die Klinke durch einen Knopfdruck entsperrt wird, nimmt der Bimetallstreifen seine ursprüngliche Stellung wieder ein und schließt den Stromkreis von neuem.

Eine andere, weit verbreitete Anwendung der Wärmewirkungen des elektrischen Stromes ist die Glühlampe. Diese ist eigentlich eine „ungewollte" Wärmequelle; denn uns interessiert das *Licht* der Lampe, nicht die von ihr entwickelte Wärme. Leider läßt sich die Wärmeerzeugung bei der Glühlampe nicht umgehen. Sie leuchtet, weil erhitzte Körper bei einer bestimmten Temperatur „nebenbei" Licht auszusenden beginnen. Gerade bei Glühlampen wird dieses „nebenbei" unerwünscht deutlich: Nur etwa 2 % der zugeführten Elektroenergie werden in sichtbares Licht umgesetzt; fast der gesamte „Rest" der Energie wird zu Wärme.

Es dauerte lange, bis aus ersten, tastenden Versuchen brauchbare Glühlampen hervorgingen. Obgleich bereits um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts Heinrich Goebel (1818 bis 1893) einige Glühlampen hergestellt hatte, begannen sie doch erst vor etwa 80 Jahren sich allgemein durchzusetzen. Forscher und Techniker aus vielen Ländern trugen dazu bei, die technischen Probleme der nur scheinbar „einfachen" Glühlampe zu lösen.

Von Anfang an war man bestrebt, die Temperatur des Leuchtfadens so hoch wie nur möglich zu machen; denn ein glühender Körper leuchtet um so heller, je heißer er ist. Man probierte die verschiedenartigsten Materialien durch, ehe man lernte, dauerhafte „Leuchtdrähte" für Glühlampen herzustellen. Dabei war besonders unangenehm, daß die temperaturbeständigsten Stoffe sich nur sehr schwer zu Drähten verarbeiten ließen. Ganz neue technologische Verfahren mußten entwickelt werden, ehe es gelang, die heute allgemein üblichen Wolfram-Leuchtdrähte herzustellen.



In freier Luft würde jeder Leuchtdraht in kürzester Zeit verbrennen. Daher wurde bereits bei den ersten Glühlampen der Leuchtdraht in einem Glaskolben ausgespannt, der anschließend luftleer gepumpt wurde. Die Leuchtdrähte verbrannten zwar nun nicht mehr, aber sie „zerstäubten"; ihr Werkstoff setzte sich als feinster Belag auf der Innenseite des Glaskolbens ab; die Leuchtdrähte wurden dünner, ihre Lebensdauer sank.

Um das Zerstäuben zu verhindern, füllte man den Glaskolben mit einem Gas, das mit dem Material des Leuchtdrahtes nicht chemisch reagierte. Moderne Glühlampen zum Beispiel enthalten eine Mischung aus Stickstoff und dem Edelgas Argon oder sind mit Krypton gefüllt.
Die Gasfüllung hatte wieder eine andere physikalische Erscheinung zur Folge: Das Gas erhitzte sich am Leuchtdraht, begann zu strömen und dabei in einem fortwährenden Kreislauf Wärme an den Glaskolben abzugeben. Dadurch aber sanken Temperatur und Helligkeit des Leuchtdrahtes. Abhilfe wurde geschaffen, indem man den Leuchtdraht auf möglichst engem Raum konzentrierte. Das führte zur Entwicklung der „Einfachwendellampen" und später der „Doppelwendellampen", die heute allgemein in Gebrauch sind.
Wir sind etwas ausführlicher auf die Glühlampe eingegangen, weil sie ein wahrhaft „leuchtendes" Beispiel dafür ist, daß man selbst bei der Entwicklung einfacher technischer Geräte die Naturgesetze kennen und konsequent anwenden muß, um Erfolg zu haben.
Physikalische Gesetze wiesen nicht nur den Weg zur modernen Glühlampe; sie zeigen gleichzeitig auch, daß der weiteren Entwicklung der Glühlampe Grenzen gesetzt sind, die bald erreicht sein werden. Deshalb kommt den Bemühungen, neuartige Beleuchtungsmethoden auszuarbeiten, immer größere Bedeutung zu. „Leuchtstofflampen", in denen Licht durch elektrische Vorgänge in verdünnten Gasen entsteht, beweisen, daß man auf neuen Wegen bereits gut vorankommt. Sicher wird uns die Zukunft Lichtquellen bringen, die keine „verkappten Elektrowärmegeräte" mehr sind.
Die Elektrowärme entsteht durch Umwandlung der Energie des elektrischen Stromes. Wir können uns vorstellen, daß die Elektronen bei ihrer Wanderung durch die Leitungen „Reibungskräfte" überwinden müssen. Die Elektrowärme ist also, grob ausgedrückt, die „Reibungswärme", die bei der Elektronenbewegung entsteht.
Da wir wissen, daß bei allen Energieumformungen der Satz von der Erhaltung der Energie gilt, werden wir nach dem „Umrechnungskurs" zwischen elektrischen und wärmetechnischen Einheiten fragen. In einer Tabelle (vgl. S. 147) haben wir ihn bereits aufgeführt: Aus 1 kWh lassen sich 860 kcal gewinnen.
Die Messung dieses „Äquivalents" ist viel einfacher als die Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents. Sie können sich mit einem Tauchsieder, einem Thermometer und

einem großen Wassereimer selbst davon überzeugen. Lassen Sie den Tauchsieder eingeschaltet, bis er eine Kilowattstunde aufnahm, messen Sie dann die Temperaturerhöhung des Wassers und die Wassermenge, so läßt sich leicht ausrechnen (vgl. S. 132), wieviel Kalorien dem Wasser durch den Tauchsieder zugeführt wurden. Daß Sie dabei einen etwas zu niedrigen Wert erhalten, erklärt sich aus den auftretenden Verlusten: Der Eimer erwärmt zum Beispiel die Zimmerluft, und diese Wärme geht für unsere Messung verloren.

Hier liegt es nahe, einmal nach dem Wirkungsgrad von Elektrowärmegeräten zu fragen. Er ist im allgemeinen recht groß. Beim Tauchsieder zum Beispiel wird fast die gesamte zugeführte Elektroenergie in nutzbare Wärme verwandelt; für überschlägige Rechnungen kann man einen Wirkungsgrad von 100 % annehmen! Bei anderen Wärmegeräten ist der Wirkungsgrad zwar geringer, doch erreicht er immerhin noch überraschend hohe Werte.

Ist es dann nicht widersinnig, daß man heute noch immer mit Öfen heizt oder sogar darum bittet, den Betrieb von Elektrowärmegeräten möglichst einzuschränken? Wir dürfen uns durch den hohen Wirkungsgrad eines Tauchsieders oder einer Kochplatte nicht täuschen lassen: Die meiste Elektroenergie entstammt heute „Wärmekraftwerken", also Kraftwerken, in denen Elektroenergie durch Verbrennung natürlicher Brennstoffe gewonnen wird. Der Wirkungsgrad *dieser* Umwandlung aber ist nicht hoch, und selbstverständlich müssen wir auch ihn in unsere Energiebilanz einbeziehen. Wenn wir elektrisch kochen, haben wir die „Feuerstelle" gewissermaßen ins Kraftwerk verlegt, und der Gesamtwirkungsgrad, gerechnet „von der Kohle bis zum warmen Mittagessen", ist viel niedriger als der Wirkungsgrad des Elektroherdes allein.

Das wirkt sich, wie ein Beispiel zeigen soll, auch unmittelbar auf unseren Geldbeutel aus. Um einen Liter Wasser von 14 °C (etwa Temperatur des Leitungswassers) auf 100 °C zu erwärmen, sind 86 kcal nötig. Benutzen wir einen Tauchsieder, so können wir annehmen, daß die zugeführte Elektroenergie restlos zur Erwärmung des Wassers verwendet wird. Wir brauchen also (vgl. S. 147) 0,1 kWh an Elektroenergie; und bei einem Kilowattstundenpreis von 8 DPf kostet uns das Heißwasserbereiten 0,8 DPf.

Und wenn wir den Topf auf einen Kohleherd stellen? In diesem Fall ist der Wirkungsgrad sehr niedrig: Etwa 90 % der im Brennstoff enthaltenen Wärme gehen ungenutzt ver-

loren, nur 10 % tragen unmittelbar zur Erwärmung des Wassers bei. Anders ausgedrückt: Der Brennstoff muß 850 kcal hergeben, damit dem Wasser tatsächlich 85 kcal zugeführt werden. Heizen wir den Ofen mit Braunkohlenbriketts, so sind, wie sich mit der Tabelle von Seite 150 sofort ausrechnen läßt, ungefähr 0,17 kg Brennstoff aufzuwenden. Sie kosten etwa 0,7 DPf. Trotz ihres niedrigen Wirkungsgrades ist die Kohlenfeuerung also billiger!
Diese Bilanz wird sich ändern, sobald uns wirkungsvollere und billigere Methoden der Energiegewinnung zur Verfügung stehen. Die vermehrte Ausnutzung und vor allem die Beherrschung der Kernkräfte werden hier grundsätzliche Wandlungen herbeiführen.
Es gibt noch einen weiteren Grund, der es verbietet, die „bequeme" Elektrowärme überall einzusetzen: Elektroenergie ist noch nicht so reichlich vorhanden, wie es wünschenswert wäre. Wir müssen mit ihr haushalten, und das heißt, daß wir sie vor allem dort einsetzen, wo sie unentbehrlich ist. Heizen können wir mit Kohle oder mit Gas; unsere Betriebe aber stünden still, wenn man ihnen die notwendige Elektroenergie entzöge, denn für sie gibt es keinen Ersatz. Wir können es uns gegenwärtig noch nicht leisten, überall elektrisch zu kochen und zu heizen. Je sparsamer wir aber heute mit Elektroenergie sind, desto eher wird es in einer friedlichen Welt soviel Energie geben, daß wir die Möglichkeiten und die Vorteile der Elektrowärme voll ausnutzen können.

Das Kraftwerk im Zellophanbeutel

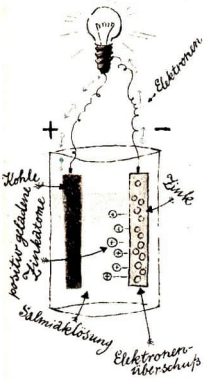
Wenn Sie Besitzer eines Kofferempfängers, eines Transistorgerätes oder auch nur einer Taschenlampe sind, wissen Sie, was mit der Überschrift dieses Kapitels gemeint ist: Die Kraftwerke im Zellophanbeutel sind „Batterien", die man für wenig Geld und in vielerlei Ausführung überall kaufen kann. Sie versorgen nicht nur Rundfunkempfänger und Taschenlampen, sondern auch mechanische Spielzeuge, Hörhilfen, Fotoblitzgeräte, Haustelefone und Signalanlagen mit dem nötigen Strom.
Jede Batterie besteht aus mehreren kleinen, voneinander isolierten Behältern, den sogenannten „Zellen" der Batterie, und jede Zelle für sich ist eine elektrische Spannungsquelle, ein „Element".

Elemente waren die ersten Spannungsquellen, mit denen es gelang, für längere Zeit stärkere Ströme fließen zu lassen. Sie gehen auf Beobachtungen des Italieners Luigi Galvani (1737 bis 1798) zurück. Er hängte präparierte Froschschenkel mit Kupferhaken an ein eisernes Gitter und stellte fest, daß die Schenkel jedesmal zuckten, wenn sie das Gitter berührten. Die Ursache des Zuckens erkannte Galvani allerdings nicht. Er war überzeugt, „tierische Elektrizität" entdeckt zu haben.

Wenige Jahre später zeigte Volta, daß es gar nicht auf die Froschschenkel, sondern nur auf die in ihnen enthaltene Flüssigkeit ankam: Zwei verschiedene Metalle (deren eines sich durch Kohle ersetzen läßt) und eine leitende Flüssigkeit können zu einer Spannungsquelle zusammengesetzt werden. Galvanis Kupferhaken, das eiserne Gitter und die feuchten Froschschenkel hatten ein solches Element gebildet; daß die Schenkel zuckten, war eine Folge des Stromes, den dieses Element hervorrief.

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts wurden zahlreiche Arten von Elementen entwickelt und eingesetzt. Ihre Bedeutung blieb jedoch beschränkt, da man bald lernte, große Mengen elektrischer Energie auf weit billigere Weise zu gewinnen (s. S. 231). Nur das um 1865 erfundene „Zink-Kohle-Element" hat auch heute noch größere Bedeutung. Wir finden es in den meisten Batterien.

Um ein Zink-Kohle-Element zusammenzusetzen, brauchen wir nur ein Gefäß mit Salmiaklösung, einen Kohlestab (oder eine Kohleplatte) und ein Stück Zinkblech. Tauchen wir das Zink in die Salmiaklösung, so treten Zinkatome in die Lösung ein. Sie sind positiv elektrisch geladen und lassen Elektronen im Zink zurück. Wegen des Elektronenüberschusses zeigt sich die Zinkplatte negativ elektrisch geladen, während sich die Flüssigkeit als positiv elektrisch erweist. Zwischen dem Zink und der Flüssigkeit entsteht eine elektrische Spannung. Um mit ihrer Hilfe einen Strom fließen zu lassen, tauchen wir auch den Kohlestab in die Salmiaklösung. Er wird durch die Flüssigkeit nicht angegriffen, gibt keine geladenen Atome ab und ist gegenüber der Zinkelektrode durch seine Berührung mit der Flüssigkeit ebenfalls positiv elektrisch. Wir haben damit eine Spannungsquelle erhalten, deren Pole die beiden in die Flüssigkeit ragenden „Elektroden" sind.

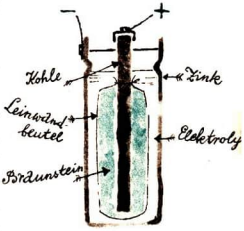


Verbindet man das Zink und die Kohle durch einen Draht, so fließt Strom: Die überschüssigen Elektronen wandern vom Zink durch den Leiter zur positiven Kohle und in die Flüssig-

keit, wo sie in positive Atome eintreten. Im Zink gibt es dadurch „Platz" für weitere Elektronen. Der Stromfluß hält an, bis sich die Zinkelektrode allmählich aufgelöst hat. Allerdings haben wir, wie bald erklärt wird, auch hier wieder „idealisiert"; denn in Wirklichkeit würden wir mit unserer Versuchsanordnung keine sehr guten Erfahrungen machen.

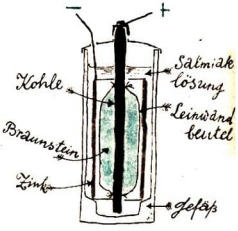
Die Spannung eines Elementes hängt nur von dem Elektrodenmaterial, nicht aber von der Größe und Form der Elektroden ab. So erzeugt zum Beispiel jedes Zink-Kohle-Element eine Spannung von etwa 1,5 V.

Die im Handel erhältlichen Zink-Kohle-Elemente sind nicht ganz so einfach gebaut. Die negative Elektrode ist becherartig geformt und nimmt alle übrigen Teile des Elementes in ihrem Inneren auf. Zu ihnen gehört zunächst die Salmiaklösung, die mit Sägemehl oder einer gallertartigen Masse eingedickt wird. Der Kohlestab steht in einem Leinwandbeutel, der Braunstein enthält. Ohne ihn wäre das Element bereits nach kurzem Stromfluß unbrauchbar: Im Betrieb setzten sich durch chemische Vorgänge im Element winzige Wasserstoffbläschen an der Elektrode ab und hüllten sie bald völlig ein. Dadurch würde die Spannung des Elementes stark absinken. Der Braunstein dagegen, eine sehr sauerstoffreiche Verbindung, „fängt" den Wasserstoff ab, indem er Sauerstoff abgibt, der sich mit dem Wasserstoff zu Wasser verbindet. Die sogenannten Luftsauerstoff-Batterien binden den Wasserstoff mit Hilfe des Luftsauerstoffs.



Zelle einer Taschenlampenbatterie

Ein Element liefert stets nur eine geringe Spannung, die im Betrieb überdies noch absinkt. Für viele Zwecke reicht sie nicht aus. Man kann jedoch, um auf höhere Spannungen zu kommen, mehrere Elemente „hintereinanderschalten". In der Taschenlampenbatterie wird stets der negative Pol der einen Zelle mit dem positiven Pol der folgenden verbunden. Zwischen den beiden „äußeren" Elektroden läßt sich (bei 3 Zellen) die dreifache Spannung abnehmen.



Zink-Kohle-Element für Klingelanlagen

So bequem Batterien und Elemente auch zu handhaben sind – für die Gewinnung größerer Mengen Elektroenergie sind sie nicht geeignet; Elemente entnehmen ihre Energie aus chemischen Umwandlungen, in deren Verlauf zum Beispiel beim Zink-Kohle-Element das Zink zersetzt wird. Man hat berechnet, daß zur Gewinnung von nur 1 kWh mehr als 1 kg Zink zersetzt werden müßte. Wollten wir unsere Wohnung mit Zink-Kohle-Elementen elektrifizieren, so wären dazu im Monat allein über 100 kg Zink erforderlich – von allen anderen Materialien und Unbequemlichkeiten ganz zu schweigen.

Sogar der Batteriebetrieb eines Kofferempfängers ist, gemessen an den normalen Strompreisen, recht teuer. Auch daran sollten die „Dauerdudler" am Ostseestrand oder im Thüringer Wald denken . . .

Elemente und Batterien werden daher nur eingesetzt, wo sehr geringe Energiemengen benötigt werden und eine Stromversorgung auf andere Weise nicht möglich ist.

Zu den chemischen Spannungsquellen zählen auch die „Akkumulatoren" oder „Sammler". Der Kraftfahrer kennt sie als „Batterie"; sie werden außerdem für Notbeleuchtungen, in Grubenlampen, als Energiequelle für Elektrokarren und in vielen Anlagen der Nachrichtentechnik gebraucht.

Akkumulatoren sind den Elementen in wichtigen Punkten überlegen: Man kann ihnen weit stärkere Ströme und größere Energiemengen entnehmen. Vor allem aber wird ihr Material nicht „verbraucht". Die Elektroenergie, die ein Akkumulator liefern soll, muß ihm vorher als elektrische Energie zugeführt werden. Bei diesem „Laden" des Akkumulators wird die zugeführte elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt und so gespeichert. Während der Stromentnahme, beim „Entladen", verwandelt sich die gespeicherte Energie in Elektroenergie zurück. Die Elektroden werden dabei nicht aufgezehrt, sondern können immer wieder benutzt werden. Ein „Akku" läßt sich, sorgsame Wartung vorausgesetzt, fast beliebig oft laden und entladen.

Am bekanntesten ist der Bleiakkumulator, der „je Zelle" eine Spannung von 2 V aufweist. Wir wollen über seine Wirkungsweise nur soviel sagen, daß er als Elektroden Bleiplatten enthält, die in verdünnte Schwefelsäure tauchen und sich mit einer Bleisulfatschicht überziehen. Beim Laden des Akkumulators werden diese Platten so verändert, daß sie ein galvanisches Element bilden. Bei der Stromentnahme, beim Entladen, bilden sich die Elektroden in ihren Ausgangszustand zurück.

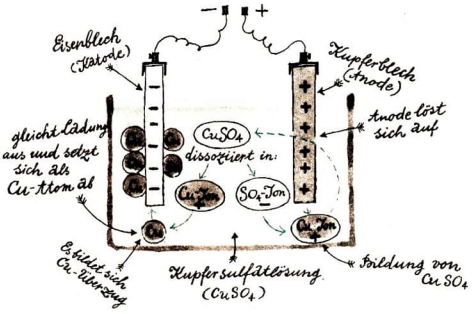
Ein Bleiakkumulator ist naturgemäß ziemlich schwer. Leichter und auch robuster ist der „Stahlakkumulator", der statt Blei Nickel- und Eisenverbindungen und als Flüssigkeit Kalilauge enthält. Seine Spannung ist etwas niedriger als die des Bleiakkumulators.

Zur Speicherung größerer Mengen an Elektroenergie sind jedoch wegen ihres Gewichts und ihrer Abmessungen auch Akkumulatoren nicht geeignet. Bis heute läßt sich Elektrizität nur in geringen Mengen „konservieren" – eine Tatsache, die sich auf die Energiewirtschaft sehr ungünstig auswirkt.

Der Akkumulator zeigt, daß nicht nur durch chemische Vorgänge Elektroenergie gewonnen werden kann, sondern daß umgekehrt der elektrische Strom tiefgreifende chemische Veränderungen hervorrufen kann. Sie haben immer die gleiche Ursache:

In einer Säure, einer Lauge oder einer Salzlösung ist stets ein Teil der Moleküle „dissoziiert", das heißt, die Moleküle sind in elektrisch geladene Atome oder Atomgruppen zerfallen. Taucht man Elektroden in die Flüssigkeit und verbindet sie mit einer Spannungsquelle, so treten elektrische Anziehungskräfte auf; die geladenen Teilchen beginnen, sich zu bewegen (deswegen nennt man sie auch „Ionen", das bedeutet „Wanderer"). Dabei „wandern" die positiv geladenen Ionen (Wasserstoff- und Metallatome) zur negativen Elektrode, die negativ geladenen Ionen (Sauerstoffatome und zahlreiche Atomgruppen) zur positiven Elektrode. An den Elektroden geben die Ionen ihre überschüssige Ladung ab oder ergänzen fehlende Ladungen. In einer leitenden Flüssigkeit transportieren also nicht Leitungselektronen, sondern Ionen die Elektrizität.

Soweit die Theorie; und nun wollen wir uns ansehen, was man mit ihr in der Praxis anfangen kann. Das Gefäß in der Skizze enthält Kupfersulfatlösung, außerdem eine Kupfer- und eine Eisenplatte. Wir verbinden die Eisenplatte mit dem negativen Pol, die Kupferplatte mit dem positiven Pol einer Spannungsquelle. Schon bald nach dem Einschalten ist zu bemerken, daß sich die Eisenplatte mit einem rötlichen Niederschlag bedeckt. Es ist Kupfer, das sich an der negativen Elektrode, der „Katode", niederschlägt.



Wie kommt das? Ein Teil der Kupfersulfatmoleküle ist bereits vor Einschalten des Stromes in (positive) Kupferionen und in (negative) „Restionen" zerfallen. Unter dem Einfluß der elektrischen Spannung beginnen die Ionen ihre Wanderung: die Kupferionen zur Katode, wo sie ihre Ladung ergänzen und haften bleiben, die negativen Restionen zur positiven Elektrode, zur „Anode", wo sie ihre überschüssige Ladung abgeben. Dabei löst sich die Anode allmählich auf; es entstehen neue Kupfersulfatmoleküle, die wieder dissoziieren. Obwohl sich ständig neue Kupferionen zur Katode begeben, ändert die Flüssigkeit ihre Zusammensetzung nicht: Jedes zur Katode abwandernde Ion wird durch ein der Anode entstammendes ersetzt.

Die Eisenplatte wird so auf elektrochemischem Wege verkupfert. Durch entsprechende Auswahl der Anode und der Flüssigkeit könnte man einen Nickel-, einen Zink-, einen Goldüberzug herstellen. Darin liegt die große technische und volkswirtschaftliche Bedeutung dieses elektrochemischen Verfahrens: Viele unserer Gebrauchsmetalle, vor allem Eisen und Stahl, werden durch feuchte Luft oder durch andere Einwirkungen leicht angegriffen und allmählich zerstört. Mit Hilfe des eben beschriebenen Verfahrens kann man sie mit einem dünnen (und daher nicht zu teueren) Überzug aus edleren Metallen versehen, die gegen äußere Einflüsse widerstandsfähiger sind. Man hängt zu diesem Zweck die Metallteile als Katode in eine entsprechende Badflüssigkeit, wählt als Anode Platten oder Blöcke aus dem Überzugsmetall und schickt elektrischen Strom durch Flüssigkeit und Elektroden. Tausende der verschiedenartigsten Teile und Produkte, vom Teelöffel bis zur Fahrradlenkstange oder zu den glänzenden Zierleisten der Kraftwagen, werden so mit einer schützenden, ansprechenden Deckschicht versehen.

Die Dissoziation kann noch mehr: Wird als Anode Metall eingebracht, das Verunreinigungen enthält, so scheidet sich bei entsprechender Badflüssigkeit an der Katode nur das reine Metall ab, während die Beimengungen zu Boden sinken. Auf diese Weise raffiniert man aus dem durch Verhüttung gewonnenen Schwarzkupfer das besonders reine „Elektrolytkupfer", das die Elektrotechnik benötigt. Auch Edelmetalle lassen sich auf elektrochemischem Wege von Verunreinigungen trennen.

Daß auch ein so wichtiges Leichtmetall wie Aluminium durch Anwendung elektrochemischer Gesetze erzeugt wird, sei als Abschluß erwähnt.

(Punkt!)

Oersteds große Entdeckung

Dem Hirten Magnes, so berichtet eine altgriechische Fabel, widerfuhr das Mißgeschick, auf einen Felsen zu treten, der die eiserne Spitze des Hirtenstabes mit solcher Gewalt festhielt, daß der erschrockene Besitzer sie nur mit Mühe lösen konnte. Jüngere Geschichten schildern den gefährlichen Magnetberg, in dessen Nähe Schiffe zum Untergang verurteilt sind, weil sämtliche Eisenteile aus ihren Planken gerissen werden.

Schon seit langer Zeit kennt man also magnetische Erscheinungen, und obwohl sie als geheimnisvoll und unheimlich empfunden wurden, wußte man sie zu nutzen: Chinesische Reisende führten schon vor der Zeitenwende kompaßähnliche Instrumente mit sich; und in den ersten Jahrhunderten unserer Zeitrechnung erwähnen chinesische Autoren den Kompaß als Hilfsmittel der Seefahrer. Auch Inder und Araber lernen ihn frühzeitig kennen, und etwa ab 1200 verbreitet sich das Wissen von der nordweisenden Nadel auch in Europa.

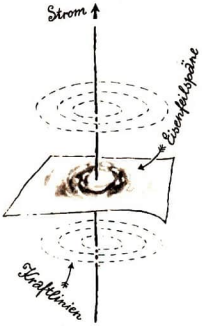
Im Laufe der Zeit beobachtete man weitere Eigenschaften des Magneten: Man fand heraus, daß auch Teile eines Magneten stets *vollständige* Magneten mit Nord- und Südpol sind, und man stieß auf das wichtige Gesetz, daß „gleichnamige" Magnetpole (z. B. die Nordpole zweier Magneten) sich abstoßen, während ungleichnamige Pole einander anziehen.

Im Jahre 1820 entdeckte der dänische Physiker Hans Christian Oersted (1777 bis 1851), daß die Magnetnadel aus ihrer Richtung gedreht wird, wenn durch einen Draht in ihrer Nähe Strom fließt. Die Magnetnadel verhält sich also ebenso, als hätte man ihr einen anderen Magneten genähert.

Ruft ein stromdurchflossener Draht wirklich magnetische Wirkungen hervor? Das war eine genaue Untersuchung wert; denn bisher war man dem Magnetismus nur als bleibender Eigenschaft des Magneteisensteins und der mit seiner Hilfe hergestellten Stahlmagnete begegnet. Außerdem deutete Oersteds Beobachtung einen Zusammenhang zwischen magnetischen und elektrischen Vorgängen an. Weitere Experimente ließen keinen Zweifel: Wie ein „natürlicher" Magnet ist auch der stromführende Draht von einem „Magnetfeld" umgeben, das heißt von einem Raumgebiet, in dem sich magnetische Wirkungen nachweisen lassen.

Wahrscheinlich wissen Sie aus Ihrer Schulzeit, wie man ein solches Magnetfeld sichtbar machen kann. Bedeckt man

einen Magneten mit einem Blatt Papier, auf das man Eisenfeilspäne streut, so ordnen sich diese zu einer charakteristischen Figur, die aus lauter einzelnen Ketten aus Eisenfeilicht zusammengesetzt ist. Ein ähnliches Bild erhielte man, wenn die Eisenfeilspäne durch winzige Magnetnadeln ersetzt würden. Die Linien geben an, welche Richtung die magnetischen Kräfte an jeder Stelle des Magnetfeldes haben. Sie sind das „Kraftlinienbild" des Magneten. Man stellt sich nämlich vor, daß jedes Magnetfeld von „Kraftlinien" ausgefüllt ist; mit ihrer Hilfe kann man die Richtung und auch die Größe der magnetischen Kräfte beschreiben. Die Kraftlinien treten – so hat man willkürlich festgelegt – aus dem Nordpol des Magneten aus und treten in seinen Südpol ein. Sie „entstehen" aber nicht an den Magnetpolen, sondern man denkt sie sich auch im Inneren des Magneten fortgesetzt. Eine magnetische Kraftlinie hat also weder einen Anfang noch ein Ende; sie ist stets in sich geschlossen.



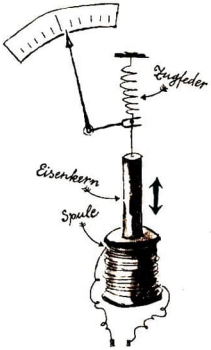
Das Magnetfeld des stromdurchflossenen Leiters kann man gleichfalls durch Eisenfeilicht veranschaulichen. Es hat die nebenstehend gezeigte Form. Das Magnetfeld wird kräftiger und läßt sich auf größere Entfernung vom Draht nachweisen, wenn man die Stromstärke erhöht. Deshalb ist auf einen Kompaß in unmittelbarer Nähe einer Hochspannungsleitung kein Verlaß.

Noch viel deutlicher werden die magnetischen Wirkungen, wenn man aus dem Draht eine Spule wickelt. Ihr Kraftlinienbild erinnert an das des Stabmagneten, und tatsächlich verhält sich die stromdurchflossene Spule wie ein Stabmagnet: Ihr eines Ende erweist sich als Nordpol, das andere als Südpol. Die Spule dreht sich, wenn sie freibeweglich aufgehängt wird, mit ihrer Längsachse etwa in die Nordsüdrichtung; sie zieht Eisen, Stahl und auch einige andere Stoffe an.

Kehrt man die Richtung des Spulenstromes um, so tauschen die Pole ihre Plätze. Aus dem Südpol wird ein Nordpol und umgekehrt. Verändert man die Stromstärke, so ändert sich auch die anziehende Kraft der Spule. Das kann man ausnutzen und ein Stromstärke-Meßinstrument, ein „Amperemeter", konstruieren. Je stärker (Bild S. 223 oben) der durch die Spule fließende Strom ist, desto tiefer wird der Eisenkern in die Spule gezogen. Seine Bewegung überträgt sich auf einen Zeiger, der vor einer Skala spielt.

Je stärker der Strom und je höher die Windungszahl, desto kräftigere magnetische Wirkungen übt eine Spule aus. Um ein Vielfaches aber läßt sich der Magnetismus einer Spule

verstärken, wenn man einen Weicheisenkern in ihren Innenraum schiebt: Spulen, die ohne Kern nur wenige Pond festzuhalten vermochten, tragen mit Kern (bei gleicher Stromstärke und Windungszahl) ohne weiteres Gewichte von einem Kilopond und mehr.



Es ist fast, als seien durch den Weicheisenkern Windungszahl und Stromstärke der Spule gestiegen. Die unsichtbaren Helfer sind „Molekularmagneten". Daß auch kleinste Teile eines Magneten stets einen vollständigen Magneten ergeben, kommt daher, daß das Eisen aus lauter winzigen „Molekularmagneten" besteht. In unmagnetischem Eisen oder unmagnetischem Stahl liegen die Molekularmagnete regellos durcheinander; ihre magnetischen Wirkungen heben sich auf und treten nach außen nicht in Erscheinung. Werden dagegen die Molekularmagnete so ausgerichtet, daß ihre Nordpole sämtlich nach der einen, die Südpole nach der anderen Seite zeigen, so machen sich die magnetischen Wirkungen auch außerhalb des Eisens bemerkbar.

Gerade das aber geschieht in der Spule: Wird der Strom eingeschaltet, so richtet das Magnetfeld der Drahtwindungen die Molekularmagnete so aus, daß sie alle parallel liegen. Der Eisenkern wird dadurch zu einem kräftigen Magneten, der die Wirkung der Spule unterstützt. Wird der Spulenstrom abgeschaltet, so verliert der Kern den größten Teil seines Magnetismus. Dieses Durcheinanderfallen der Molekularmagnete läßt sich sogar hörbar machen, womit gleichzeitig ein Beweis dafür erbracht ist, daß die Molekularmagnete tatsächlich existieren.

magnetisch

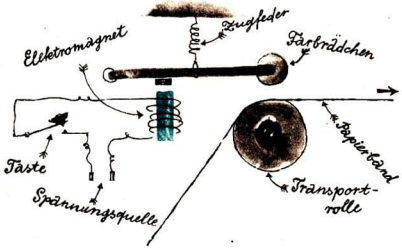
Bringt man einen Stahlkern in eine Spule, so wird er durch das Magnetfeld des Stromes ebenfalls magnetisiert. Im Gegensatz zum Weicheisen behält er aber einen großen Teil seines Magnetismus. Die Molekularmagnete bleiben nahezu ausgerichtet; der Stahlstab wird zum Dauermagneten. Bei der Herstellung von Dauermagneten und beim Magnetisieren von Kompaßnadeln verfährt man heute fast immer nach dieser Methode.

Damit haben wir nicht nur erklärt, warum die magnetischen Wirkungen einer Spule durch den Eisenkern verstärkt werden; wir gewannen noch eine viel wichtigere Erkenntnis: Elektrizität und Magnetismus stehen nicht nur in einer Wechselbeziehung, sondern sind eng miteinander verknüpft. Auch hier wieder sehen wir, wie sich in der Naturwissenschaft oft scheinbar voneinander unabhängige Vorgänge schließlich als zwei Seiten eines größeren Zusammenhanges zeigen.

Eine Spule mit Eisenkern nennen wir einen Elektromagneten. Es gibt kein anderes Bauelement der Elektrotechnik, das ebensooft wie er angewendet wird. In den Lasthebemagneten wird vor allem seine Anziehungskraft ausgenutzt. Der „Kern" der Spule wird dabei so geformt, daß er die Spule auch von außen umschließt. Die Last hängt am „Anker" des Magneten. Bei dieser Anordnung treten überhaupt keine Kraftlinien in die Luft aus; die anziehende Wirkung des Magneten wird dadurch weiter verstärkt. Lasthebemagneten können – bei entsprechender Stromstärke und Windungszahl – viele Megapond mühelos heben. Schrotteile, sperrige Blechabfälle usf. können mit Lasthebemagneten viel rascher und einfacher verladen werden als mit allen anderen Methoden.

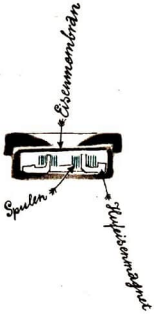
Doch das ist nur *eine* Anwendung des Elektromagneten. Die vielen anderen können wir nicht einmal vollständig aufzählen: Die elektrische Klingel, der Summer, der automatische Pförtner an der Haustür, die kleinen Weichen der elektrischen Spielzeugeisenbahn und ihre großen Schwestern bei der Reichsbahn enthalten Elektromagneten. Elektromagneten schalten bei zu starken Strömen den Stromkreis ab, halten Werkstücke auf „magnetischen Spannplatten" fest, steuern elektrische Uhren und bremsen selbsttätig Schnellzüge, die ein Signal überfahren haben.

Unten sehen wir die vereinfachte Skizze eines „Morseapparates" (Der Maler Samuel Morse, 1791 bis 1872, entwickelte den schreibenden Telegraphen). Sein wichtigster Teil ist ein Elektromagnet. Sobald die Taste niedergedrückt wird, zieht der Magnet ein Eisenplättchen, den Anker, an und preßt ein Farbrädchen gegen einen laufenden Papierstreifen. Im Rhythmus des Morsealphabets werden Punkte und Striche geschrieben. Wenn auch in den vergangenen Jahrzehnten der einfache Morseapparat die steigenden Ansprüche des Nach-



richtenverkehrs nicht mehr befriedigen konnte und durch moderne, kompliziertere Geräte ersetzt wurde; so sind auch im Schnelltelegraphen und im Fernschreiber Elektromagneten unentbehrlich.

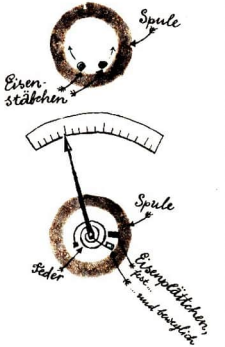
Einen Fernsprecher gäbe es ohne Elektromagneten ebenfalls nicht. Wenn wir die Wählscheibe drehen, schicken wir Stromstöße durch Elektromagneten im Fernsprechamt. Diese drehen die Kontaktarme der „Wähler" und stellen die gewünschte Verbindung her. Andere Elektromagneten sind daran beteiligt, daß Freizeichen oder Besetztzeichen ertönen. Daß wir diese Zeichen und vor allem die Stimme unseres Gesprächspartners vernehmen können, verdanken wir ebenfalls einem Elektromagneten: Im Telefonhörer ist ein hufeisenförmiger Magnet untergebracht. Auf seinen Schenkeln sitzen zwei Spulen, die mit sehr dünnem Draht bewickelt sind. Vor den Magnetpolen ist eine Eisenmembran federnd ausgespannt. Den Spulen werden sehr schwache Ströme – vom Mikrofon des Gesprächspartners kommend – zugeleitet, die ihre Stärke und Richtung genau im Takt der Sprachschwingungen verändern. In eben diesem Takt wird durch den Elektromagneten die Membran mehr oder weniger angezogen. Sie versetzt dabei die Luft in Schallschwingungen, die wir hören können.



Auch für die Kernforschung und Kerntechnik sind Elektromagneten wichtige Hilfsmittel, da man mit ihnen kleinste elektrisch geladene Teilchen in bestimmte Bahnen zwingen kann. Diese Magneten erreichen oft gewaltige Abmessungen: Im Zentralen Institut für Kernforschung unserer Republik gibt es einen Elektromagneten, dessen Eisenkern 120 Mp wiegt; im Kernforschungszentrum Dubna (UdSSR) arbeitet ein Magnet von 36000 Mp Gewicht! Was ist dagegen der Felsblock, an dem die Stabspitze des Hirten Magnes hängenblieb?

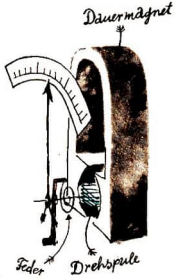
Nur eine einfache Regel

Im vorigen Kapitel haben wir erfahren, wie nützlich *ein* Elektromagnet sein kann. Doch was geschieht, wenn zwei Magneten miteinander in Wechselwirkung treten? Eine Regel, die das gegenseitige Verhalten zweier Magneten bestimmt, kennen wir bereits: Gleichnamige Magnetpole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen sich an.



Legen wir in das Innere einer Spule zwei Weicheisenstäbchen und schalten wir den Strom ein, so springen die Stäbchen zur Seite auseinander. Sie werden durch das magnetische Feld der Spule magnetisiert; an ihren Enden bilden sich gleichnamige Pole, die sich abstoßen und so die Stäbchen auseinandertreiben.

Nach diesem Prinzip arbeitet ein verbreitetes elektrisches Meßinstrument. Der zu messende Strom durchfließt die Spule des Instruments. In ihrem Innenraum stehen sich zwei Plättchen aus Eisenblech gegenüber. Eines davon ist unbeweglich, das andere ist an einer drehbaren Achse befestigt. Fließt Strom durch die Spule, so dreht sich das bewegliche Plättchen in der Pfeilrichtung. Dabei muß es die Gegenkraft einer Feder überwinden. Der Drehwinkel hängt daher von der abstoßenden Kraft ab, und da diese durch die Stromstärke bestimmt wird, ist auch er ein Maß für die Stärke des Spulenstromes. Die Achse ist mit einem Zeiger gekoppelt, der es ermöglicht, die Stromstärke auf einer Skala abzulesen. Derartige „Dreheiseninstrumente" sind also recht einfach gebaut; sie arbeiten daher auch unter „rauhen" Betriebsbedingungen zufriedenstellend. Außerdem lassen sie sich für Gleichstrom- und für Wechselstrommessungen verwenden.



Ein sehr empfindliches und auch sehr genaues Meßinstrument für Gleichstrom ist das „Drehspulinstrument". Zwischen den Polen eines Dauermagneten ist eine leichte Spule drehbar gelagert. Der Strom wird ihr durch zwei Federn zugeleitet, die außerdem die Spulendrehung zu hemmen suchen. Die Spulenachse trägt an ihrem Vorderende einen Zeiger.

Sobald Strom fließt, wird die Spule zum Elektromagneten. Ihr Nordpol wird vom Nordpol des Dauermagneten abgestoßen, von seinem Südpol dagegen angezogen; ihr Südpol weicht dem Südpol des Dauermagneten aus und sucht sich dem Nordpol zu nähern. Infolgedessen dreht sich die Spule. Der Drehwinkel hängt wiederum von der Stromstärke ab. Sie kann an einer Skala abgelesen werden.

Die Spule des Instrumentes dreht sich gegen die Kraft der Federn; es wird demnach von ihr Arbeit geleistet, die der Energie des elektrischen Stromes „abgezweigt" wird. Beim Meßinstrument ist dieser Eigenverbrauch eine unerwünschte Beigabe. Doch könnte man nicht, um eine geläufige Redensart zu gebrauchen, „aus der Not eine Tugend machen" und die bei der Drehbewegung verrichtete Arbeit nutzen?

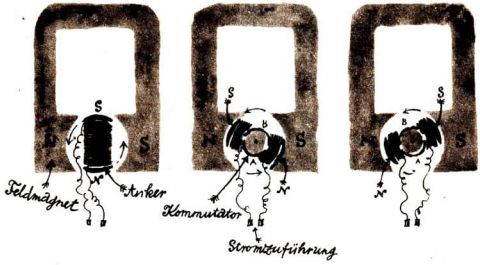
Sie wissen natürlich längst, daß das möglich ist; denn auch

Sie lassen sich von Elektromotoren helfen, sei es an Ihrem Arbeitsplatz, sei es bei der Straßenbahnfahrt zum Betrieb, beim Kaffeemahlen mit der elektrischen Universal-Küchenmaschine oder wo immer durch Motoren elektrische Energie in mechanische Arbeit verwandelt wird.

Betrachten wir die Skizze unten. Zwischen den Polen eines Dauermagneten kann sich eine Spule drehen. Sie wird, damit sie kräftige magnetische Wirkungen zeigt, mit einem Eisenkern versehen. Der Dauermagnet und der Eisenkern sind so gestaltet, daß die Kraftlinien nur auf einer kurzen Strecke durch Luft verlaufen. Die „Hilfestellung" der Molekularmagneten kann sich so voll auswirken.

Schicken wir Strom durch die Spule, so entsteht an ihrem einen Ende ein Nordpol, am anderen ein Südpol, und wie die Spule des Drehspulinstruments dreht sie sich. Da die Drehung aber nicht durch Federn abgebremst wird, hört sie erst auf, wenn die ungleichnamigen Pole der drehbaren Spule (man nennt sie „Anker" oder „Läufer" des Motors) und des festen Magneten (er heißt „Feldmagnet") einander gegenüberstehen.

Der Läufer würde sich im günstigsten Fall um fast 180 Grad drehen. Von einem Elektromotor jedoch verlangt man eine ständige Drehbewegung. Auch diesmal zeigt uns die Regel von der Anziehung und Abstoßung der Magnetpole den Ausweg: Wenn sich der Nordpol des Läufers auf den Südpol des Feldmagneten zubewegt, dreht er sich wegen der Trägheit der Spule ein kleines Stückchen zu weit und pendelt erst anschließend in die Ruhestellung ein. Läßt man nun gerade in dem Augenblick, da der Nordpol „über sein Ziel hinausschießt", die anziehende in eine abstoßende Kraft übergehen, so dreht sich der Läufer weiter; denn jetzt wird er ja vom



Pol des Feldmagneten weggetrieben. Nach einer weiteren halben Umdrehung könnte man diesen Kräftewechsel wiederholen. Die Folge wäre, daß sich der Läufer ununterbrochen weiterdrehte. Die Versuchsanordnung wäre tatsächlich zum Elektromotor geworden.

Der Wechsel zwischen Anziehung und Abstoßung läßt sich sehr einfach erreichen. Kehrt man die Stromrichtung im Läufer um, so vertauschen sich seine Pole. Kehrt man sie gerade dann um, wenn die Läuferpole sich an den Polen des Feldmagneten vorbeidrehen, so sind wir bereits am Ziel: Aus der Anziehung wird eine Abstoßung; der Anker dreht sich weiter. Aber wer schaltet den Strom um? Man kann beim Elektromotor, dessen Läufer in jeder Sekunde viele Umdrehungen ausführt, nicht eine Umschaltung von Hand vorsehen, wie sie an den Ventilen der ersten Dampfmaschinen üblich war (vgl. S. 154). Das Umkehren der Stromrichtung muß der Elektromotor selbst besorgen. Zu diesem Zweck werden die beiden Enden des Läuferspulen-Drahtes an zwei voneinander isolierte Halbzylinder geführt, die auf der Läuferachse befestigt sind und sich mit ihr drehen. Über die Halbzylinder schleifen zwei „Bürsten", die dem Anker den nötigen Strom zuführen. In der mittleren Skizze des Bildes auf S. 227 fließt der Ankerstrom von A nach B. Wenn die Läuferpole genau vor den Polen des Feldmagneten stehen, gehen die Bürsten von einem Halbzylinder auf den anderen über. Der Ankerstrom fließt nunmehr von B nach A, das heißt, seine Richtung hat sich umgekehrt. Nach jeder weiteren halben Umdrehung wiederholt sich das Spiel. Die Umschaltvorrichtung, der „Kommutator", sorgt also tatsächlich dafür, daß die magnetischen Kräfte den Motor ununterbrochen drehen können.

Unser Motor weist noch einige Mängel auf. So stört es, daß er nur jeweils nach einer halben Umdrehung einen kräftigen „Anstoß" erhält, während die treibenden Kräfte verhältnismäßig gering sind, wenn die Ankerpole „quer" zu den Polen des Feldmagneten stehen. Deshalb bringt man – von Kleinstmotoren abgesehen – auf dem Läufer eines Elektromotors mehrere Spulen an, die gegeneinander um einen bestimmten Winkel verdreht sind. Der Kommutator enthält eine entsprechende Zahl von Segmenten; jeweils zwei gegenüberliegende werden mit den Drahtenden einer Läuferspule verbunden.

Die magnetischen Kräfte, die ein Dauermagnet ausüben kann, sind beschränkt. Für leistungsfähige Motoren würden

sie nicht ausreichen. Deshalb wird bei allen größeren Motoren auch der Feldmagnet als Elektromagnet ausgebildet. Je nachdem, wie die Wicklung des Feldmagneten und die des Läufers zusammengeschaltet werden, ergeben sich Motoren mit verschiedenen Betriebseigenschaften.
Beim „Hauptschlußmotor" zum Beispiel fließt der Strom nacheinander durch Anker- und Feldmagnetwindungen. Ein solcher Motor besitzt ein sehr großes Anzugsvermögen und ist daher gut für elektrische Bahnen geeignet.
Verzweigt sich der Motorstrom, so daß ein Teil durch die Ankerwindungen, der andere durch die Feldwindungen fließt, so erhält man einen „Nebenschlußmotor". Seine Drehzahl läßt sich leicht regulieren und ist verhältnismäßig unabhängig davon, ob die vom Motor aufzubringende Zugkraft schwankt. Nebenschlußmotoren treiben daher häufig Werkzeugmaschinen an.
Elektromotoren stehen heute in allen Leistungsabstufungen, für die verschiedensten Drehzahlen und für jeden Spezialzweck zur Verfügung. Als besonders einfach erwiesen sich Wechselstrommotoren, auf die wir noch zurückkommen werden. Wie keine andere Antriebsmaschine haben die Elektromotoren die Produktionstechnik gefördert, und immer mehr Motoren werden uns in der Zukunft von mechanischer Arbeit befreien. Sie alle aber sind letzten Endes nichts anderes als sinnreiche Anwendungen der so „harmlos" klingenden Regel von den Anziehungs- und Abstoßungskräften zwischen Magnetpolen.

Mit dem Stabmagneten fängt es an . . .

Man wußte in den ersten Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts schon allerhand vom elektrischen Strom: Man hatte Drähte aufglühen gesehen und sich vom elektrischen Lichtbogen zwischen zwei Kohlestiften blenden lassen. Man kannte die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes und hatte erfahren, daß er auch chemische Vorgänge und Erscheinungen verursacht oder beeinflußt.
Anwendungen für die chemischen, magnetischen und Wärmewirkungen des Stromes „lagen in der Luft". Doch wo sollte man den nötigen Strom herbekommen? In Laboratorien konnte man es sich zur Not leisten, ihn aus kostspieligen Elementen und Batterien zu beziehen. Doch für technische

Anwendungen war diese Energiequelle ungeeignet. Ein Vergolden auf elektrochemischem Wege wäre wegen der Batteriekosten mindestens bei kleinen Gegenständen nicht billiger gewesen, als wenn man diese aus massivem Golde angefertigt hätte. Für die Betriebskosten *einer* aus Elementen gespeisten Lichtbogenlampe hätte man Tausende von Kerzen kaufen können; die Antriebskräfte aus batteriegespeisten Elektromotoren wären unerschwinglich gewesen.

So war es *die* Voraussetzung für die Entwicklung einer über die Laboratorien hinausreichenden Elektro*technik*, daß man lernte, Elektroenergie in großen Mengen und billig zu gewinnen.

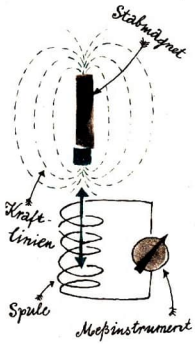
Der erste, der einen ganz neuen Weg der Elektrizitätserzeugung wies, war der Engländer Michael Faraday (1791 bis 1867). Faraday war „von Hause aus" nicht zum Gelehrten bestimmt. Im Gegenteil: Sein Vater, ein Schmied, brachte nicht einmal soviel Geld auf, um dem kleinen Michael eine ausreichende Schulbildung zu ermöglichen. Michael Faraday mußte seinen Wissensdurst vor allem aus den Büchern stillen, die er als Buchbinderlehrling in die Hände bekam. Außerdem besuchte er eifrig die öffentlichen Vorträge, die damals in der „Royal Institution", der englischen Akademie der Wissenschaften, abgehalten wurden. Ihr Präsident, Humphry Davy (1778 bis 1829), wurde auf den jungen Faraday aufmerksam und trug ihm eine Beschäftigung im Laboratorium an. So begann die wissenschaftliche Laufbahn Faradays, der als einer der größten Experimentalphysiker gilt.

Wir haben diese biographische Bemerkung nicht ohne Grund eingefügt: Diejenigen, die wohl an der Arbeitskraft, nicht aber an der Bildung des „Volkes" interessiert sind, führen Faraday gern als „Beweis" dafür an, daß ein Genie sich auch ohne Förderung durchsetze. Nun, hier und da mag das wohl der Fall sein, doch wieviel „Faradays" dürften schon gelebt haben, die ihre Fähigkeiten nicht ausbilden und nutzen konnten, weil ihnen kein „Davy" begegnete. Wir, die wir die zahlreichen Bildungsmöglichkeiten eines Arbeiter-und-Bauern-Staates als selbstverständlich hinnehmen, sollten ruhig einmal die Zeit opfern, Michael Faradays Lebensgeschichte nachzulesen und darüber nachzudenken . . .

Elektrischer Strom verursacht Magnetismus. Faraday war von der Umkehrbarkeit dieses Satzes überzeugt. Es mußte möglich sein, mit Hilfe eines Magneten elektrischen Strom hervorzurufen. 1831 entdeckte Michael Faraday nach langen Versuchen die „elektromagnetische Induktion", die Umwand-

lung mechanischer in elektrische Energie. Der Grundversuch ist sehr einfach:

Verbindet man die Drahtenden einer Spule mit einem empfindlichen Spannungsmeßinstrument, so zeigt dieses einen Ausschlag, sobald man einen Stabmagneten der Spule nähert und in sie eintaucht. Es entsteht durch die Annäherung in der Spule eine elektrische Spannung, die Strom durch das Instrument treibt. Der Ausschlag verschwindet, sobald der Magnetstab stillsteht. Entfernen wir den Stab wieder, so schlägt das Instrument erneut aus, zeigt allerdings, daß der Strom jetzt in entgegengesetzter Richtung fließt.

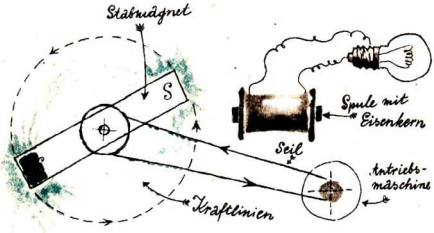


Der Ausschlag des Instruments wächst mit der Windungszahl der Spule und mit der Geschwindigkeit der Stabbewegung. Das gleiche Versuchsergebnis erhält man auch, wenn der Stab ruht und statt dessen die Spule bewegt wird.

Dreierlei ist also nötig, damit ein „Induktionsstrom" hervorgerufen wird: ein Magnet, ein Leiter (in der Skizze die Spule) und „Bewegung". Die Größe der entstehenden Spannung, die Richtung des Induktionsstromes und der Einfluß der Stabgeschwindigkeit wurden in Regeln und Formeln erfaßt, auf die wir nicht eingehen wollen. Wichtig ist: In einem Leiter entsteht immer eine Spannung, wenn die Zahl der den Leiter „schneidenden" Kraftlinien eines Magnetfeldes sich ändert; je schneller diese Änderung erfolgt, desto höher ist die „Induktionsspannung". Daß die Spannung auch von der Windungszahl der Spule abhängt, können wir uns so erklären, daß in jeder einzelnen Windung eine Spannung entsteht und daß diese Spannungen sich addieren.

Wir müssen Arbeit aufwenden, um den Magnetstab der Spule zu nähern oder von ihr zu entfernen. Diese mechanische Arbeit findet sich – von Verlusten sei abgesehen – in der Energie des Induktionsstromes wieder. Selbstverständlich gilt auch für diese Umwandlung das Gesetz von der Erhaltung der Energie.

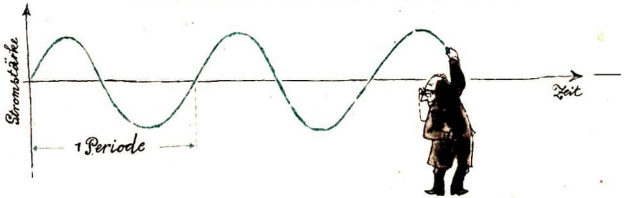
„Generatoren" heißen die Maschinen, in denen sich diese Umwandlung im Großen vollzieht; fast der gesamte Elektroenergiebedarf der Welt wird in ihnen erzeugt. Die Abbildung auf Seite 232 oben zeigt uns links ein einfaches Generatormodell. Vor einer Spule mit Eisenkern dreht sich ein Stabmagnet. Dabei wird die Spule von einer sich ständig ändernden Zahl von Kraftlinien geschnitten. Es entsteht eine Spannung, deren Größe fortwährend zwischen Null und einem Höchstwert pendelt. Darüber hinaus aber ändert diese Spannung nach jeder halben Umdrehung ihr Vorzeichen, je nach-



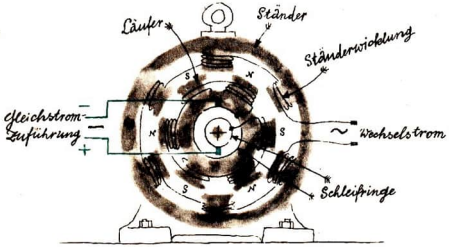
dem, ob sich der Spule ein Nord- oder ein Südpol des Stabmagneten nähert. Ist zum Beispiel während einer halben Umdrehung der linke Spulenanschluß Pluspol, der rechte Minuspol, so sind während der nächsten halben Umdrehung die Pole vertauscht: Der Pluspol liegt am rechten Spulenanschluß, der Minuspol am linken.

Eine Spannung, die in dieser Weise periodisch ihre Größe und Richtung ändert, heißt „Wechselspannung". Im Gegensatz zu ihr waren die Spannungen, die wir bisher kennenlernten, „Gleichspannungen", die ihre Größe ständig beibehielten und ihre Pole nicht wechselten.

Da in einem stromführenden Draht die Elektronen stets vom positiven zum negativen Pol wandern, ändert sich die Richtung des von einer Wechselspannung angetriebenen Stromes gleichfalls fortwährend; da überdies auch die Höhe der Spannung dauernd schwankt, wechselt die Stärke dieses Stromes ebenfalls. Es fließt „Wechselstrom". Sein zeitlicher Verlauf läßt sich durch die „Wechselstromkurve" darstellen: Die Stromstärke steigt bis auf einen Höchstwert und sinkt dann wieder bis auf Null. In diesem Augenblick kehrt sich die Stromrichtung um; der Strom fließt, stärker werdend, in entgegengesetzter Richtung, durchläuft einen Tiefstwert und fällt bis auf Null, worauf sich der Vorgang wiederholt.



Eine vollständige Schwingung des Wechselstromes nennt man eine Periode. Die Zahl der Perioden in einer Sekunde heißt „Frequenz" des Wechselstromes. Sie wird in der Einheit „Hertz" (Hz) gemessen, zur Erinnerung an Heinrich Hertz (1857 bis 1894), dessen experimentelle Untersuchungen den Ausgangspunkt der Funktechnik bildeten. Besitzt ein Wechselstrom zum Beispiel eine Frequenz von 50 Hz, so durchläuft er in jeder Sekunde 50 Perioden. Übrigens ist dies in vielen Ländern die genormte Frequenz der Licht- und Kraftnetze.
In den meisten elektrischen Leitungsnetzen fließt Wechselstrom, und demzufolge sind auch die Maschinen und Geräte für Wechselstrom konstruiert. Nur in der Elektrochemie und in der Nachrichtentechnik kommt man nicht ohne Gleichstrom aus. Auch er wird aber meistens erst an Ort und Stelle aus Wechselstrom gewonnen.



Warum aber diese Bevorzugung des Wechselstromes? Einen der Gründe kennen wir schon: Der rotierende Magnetstab hat gezeigt, wie einfach es ist, Wechselstrom zu gewinnen. Alle Generatoren in Kraftwerken arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Die obenstehende Abbildung zeigt eine der vielen möglichen Ausführungen:
Auf dem „Ständer" des Generators sitzen die Spulen, in denen die Spannung entsteht. Sie sind so zusammengeschaltet, daß die Einzelspannungen sich addieren. Vor den Ständerspulen kreist der „Läufer". Wir können ihn uns aus drei Stabmagneten entstanden denken. Allerdings erkennen wir auch auf dem Läufer Drahtwicklungen. Er ist nicht aus Dauermagneten, sondern aus Elektromagneten zusammengesetzt. Dauermagneten wären für leistungsfähige Generatoren zu schwach.

Den Wicklungen des Läufers muß Strom zugeleitet werden. Hier läßt sich nur Gleichstrom verwenden, der über „Bürsten" (vgl. S. 228) und zwei Schleifringe zugeführt wird. Man entnimmt ihn der sogenannten „Erregermaschine", die von der Generatorwelle mit angetrieben wird.

Die Erregermaschine ist ein Gleichstromgenerator. Zunächst entsteht in ihr, wie übrigens in jedem Generator, auch eine Wechselspannung. Sie wird mit einem Kommutator, wie er uns beim Elektromotor begegnete, „gleichgerichtet". Die Spannung wird nach jeder halben Umdrehung so umgeschaltet, daß der Strom der Erregermaschine stets in einer Richtung fließt. Bei sehr großen elektrischen Leistungen kann man den Kommutator aus technischen Gründen nicht anwenden; deshalb gibt es keine Gleichstrom-Großgeneratoren.

Zur „Erregung" der Läuferpole dagegen braucht man eine nur verhältnismäßig geringe Leistung, die sich ohne weiteres mit einer Kommutatormaschine erzeugen läßt.

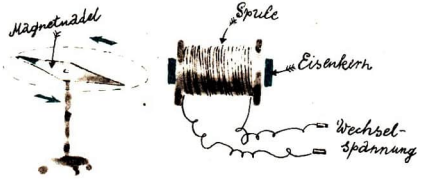
Unser Bild stellte eine „Innenpolmaschine" dar, deren Magnetpole sich innerhalb der feststehenden Ständerspulen drehen. Fast alle Großgeneratoren sind Innenpolmaschinen. Daneben gibt es noch „Außenpolmaschinen". Bei ihnen rotieren die Spulen im Innenraum zwischen den feststehenden Magneten. Diesmal muß der erzeugte Strom über Schleifringe abgenommen werden. Auch das ist nur bei verhältnismäßig geringen elektrischen Leistungen möglich.

Generatoren werden fast stets durch Wasser-, Dampf- und in neuester Zeit bisweilen auch durch Gasturbinen angetrieben. Leistung und Abmessungen sind gewaltig: Ein Großgenerator erreicht mit seiner Turbine Längen von mehr als 25 m. Generatoren für Leistungen von 300 000 kW – das sind etwa 400 000 PS – gibt es bereits; noch größere Einheiten werden projektiert.

Nicht nur der verhältnismäßig einfache Aufbau der Generatoren ist ein Vorteil des Wechselstromes. Auch Wechselstrommotoren sind im allgemeinen unkomplizierter als Gleichstrommotoren. Daß zum Beispiel die Magnetnadel und die Spule im Bild auf S. 235 einen Wechselstrommotor darstellen, sieht man ihnen gewiß nicht an. Aber es ist so: Versetzen wir die Nadel mit zwei Fingern in sehr rasche Rotation, so dreht sie sich weiter, solange die Spule von Wechselstrom durchflossen wird.

Der Strom durch die Spule ändert bei der Frequenz des Lichtnetzes in jeder Sekunde 100mal seine Richtung. Am

Vorderende der Spule treten daher in jeder Sekunde 50mal ein Nordpol und 50mal ein Südpol auf. Nehmen wir nun an, die Nadel sei durch das „Anwerfen" auf eine solche Drehzahl gebracht worden, daß ihr Nordpol jedesmal an der Spule vorbeiläuft, wenn dort gerade der Polwechsel vom Süd- zum Nordpol stattfindet. Beim Näherkommen wird die Nadel vom Südpol angezogen, nach dem Wechsel „schiebt" sie der Nordpol weg. Die Nadel erhält also einen gewissen Antrieb, sie



wird etwas schneller und kann die Reibungskräfte überwinden. Bei der nächsten Umdrehung wiederholt sich der Vorgang; die Nadel läuft ununterbrochen weiter. Würde man sie durch einen kräftigen Stabmagneten ersetzen, so könnte dieser Motor bereits Arbeit verrichten.

Die Drehzahl dieses Motors wird ausschließlich durch die Frequenz des Netzwechselstromes bestimmt. Ist eine Stromperiode abgelaufen, muß die Nadel gerade eine Umdrehung vollendet haben. Läuft sie anfänglich zu schnell, so spielt sie sich rasch von selbst auf die richtige Geschwindigkeit ein, denn sie wird dann noch nach dem Passieren des Spulenendes von dem dort noch vorhandenen Südpol „zurückgezogen" und etwas abgebremst.

Ist die Nadel dagegen zu langsam, wird der Motor „überlastet"; wenn wir ihn mit dem Finger leicht abbremsen, kommt die Drehbewegung zur Ruhe. Die Nadelspitze trifft verspätet bei der Spule ein. Dort hat bereits der Polwechsel stattgefunden, der Nordpol stößt schon die näherkommende Nadel zurück. Bei jeder Umdrehung wird die Verspätung größer.

Motoren, die so starr mit der Netzfrequenz gekoppelt sind, heißen „Synchronmotoren". Sie werden bevorzugt eingesetzt, wenn es auf genau gleichbleibende Drehzahl ankommt. Werden sie überlastet, bleiben sie wie unsere Magnetnadel stehen.

Daneben gibt es „Asynchronmotoren". Sie sind nicht ganz so starr mit der Frequenz des Netzwechselstromes gekoppelt und weit unempfindlicher gegen Überbelastungen. Auch Asynchronmotoren sind einfacher gebaut als Gleichstrommotoren. Sie werden überall in der Produktionstechnik als Antriebsmotoren eingesetzt.

Energie strömt durch das Land

Es genügt nicht, die Erzeugung elektrischer Energie technisch zu meistern und immer neue Möglichkeiten ihrer Anwendung zu ersinnen. Nicht weniger wichtig ist es, sie so zu verteilen, daß sie jedem zugute kommt. Das wird durch die wertvollste Eigenschaft der Elektroenergie möglich: Sie läßt sich durch Drähte fortleiten, braucht keine Straßen, keinen „Transportraum" und wird dadurch überall verfügbar.

Wollte man die Elektroenergie jeweils erst am Verbrauchsort gewinnen, ginge dieser Vorteil verloren; denn nach wie vor müßte man Brennstoffe herbeischaffen und lagern, Kessel anheizen, Schlacken entfernen, die Rauchgase unschädlich machen oder Wasserturbinen installieren. Außerdem wäre die Elektroenergie bei dieser Erzeugungsweise zu teuer. Elektrischer Strom läßt sich in Großkraftwerken viel wirtschaftlicher gewinnen als in kleinen, örtlichen Anlagen. So erklärt es sich, daß wir heute die elektrische Energie aus Kraftwerken beziehen, die nicht selten Hunderte von Kilometern entfernt liegen.

Noch in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts begann man, sich mit der Fernleitung elektrischer Energie zu beschäftigen. Eine der ersten Fragen, die dabei geklärt werden mußten, war die nach der Spannung, mit der die elektrischen Ströme übertragen werden sollten.

$\mathcal{N} = \mathcal{U} \cdot \mathcal{I}$

Wie wir wissen, ist die elektrische Leistung durch das Produkt aus Spannung und Stromstärke bestimmt.

Soll also eine bestimmte elektrische Leistung ferngeleitet werden, so kann das mit niederer Spannung und hoher Stromstärke oder aber mit hoher Spannung und geringen Stromstärken geschehen. Anders ausgedrückt: Jede Erhöhung der Spannung ermöglicht bei gleicher Übertragungsleistung ein Herabsetzen der Stromstärke und umgekehrt.

Die „Abnehmer" des elektrischen Stromes forderten eine niedrige Spannung. Sie hatten gute Gründe dafür: Nur bei

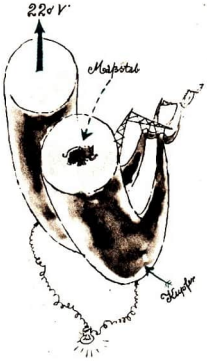
niedrigen Spannungen lassen sich die Gefahren des elektrischen Stromes durch einfache Isolierungsmaßnahmen einschränken. Leitungen, Schalter, Geräte, Motoren wären unhandlich, zu schwer und zu teuer geworden, wenn man mit hohen Spannungen hätte arbeiten müssen. So legte man für die Lichtnetze Spannungen von 220 V und für den „Kraftstrom", der größere Motoren treibt, eine Spannung von 380 V fest.

Diese Spannungen sind zwar technisch leicht zu beherrschen, lassen aber keine Energieübertragung auf größere Entfernung zu. Auch sämtliche Leitungen sind nämlich „Stromverbraucher". Stets wird in ihnen ein Teil der zu transportierenden Elektroenergie in nutzlose Wärme verwandelt.

Diese Verluste hängen zunächst vom Widerstand der Leitungen ab: Verdoppelt er sich, so steigen auch die Energieverluste auf das Doppelte.

Viel nachdrücklicher als der Widerstand wirkt sich jede Änderung der Stromstärke aus: Verdopplung der Stromstärke bedeutet vierfache Verluste, Verdreifachung der Stromstärke hat neunfache Verluste zur Folge. Andererseits sinken die Verluste auf ein Viertel, wenn man die Stromstärke auf die Hälfte herabsetzt.

Eine Verminderung des Widerstandes ist nur begrenzt möglich, denn sie läuft letzten Endes auf eine Vergrößerung des Drahtdurchmessers hinaus (vgl. S. 207). Bei den elektrischen Leistungen, wie sie heute übertragen werden, reichte aber alles Kupfer der Welt nicht für die Leitungsnetze aus, wenn man bei 220 V übertragen wollte. Außerdem würden aus den Leitungen, seien sie nun aus Kupfer oder aus Aluminium, so dicke „Stangen", daß diese sich nirgends unterbringen ließen.



Also mußte man sich für die Verringerung der Stromstärke und damit gleichzeitig für eine Erhöhung der Übertragungsspannung entscheiden. Mit 2000 V begann man im Jahre 1882, mit Spannungen bis 400000 V arbeiten wir heute; noch höhere Übertragungsspannungen wurden bereits erprobt und sollen für sehr weitläufige Energieverteilungsnetze in den kommenden Jahren eingeführt werden.

Hohe Spannung für die Fernleitung – niedrige Spannung für den Verbraucher: Diese Forderungen sind nur zu vereinen, wenn die Elektroenergie am „Ziel" auf eine niedrige Spannung transformiert wird. Doch auch im Kraftwerk muß der Strom „umgespannt" werden, wenn auch in umgekehrter Richtung. Aus technischen Gründen kann man in Generato-

ren nur Spannungen von einigen tausend Volt erzeugen, die weit unter den Übertragungsspannungen der Fernleitungsnetze liegen. Es bleibt daher nichts übrig, als die Generatorspannung nachträglich auf den geforderten hohen Wert zu bringen.

Das Umspannen von Gleichstrom bereitet große Schwierigkeiten. Zur Zeit, als die ersten Fernleitungsnetze entstanden, waren diese Schwierigkeiten unüberwindlich.

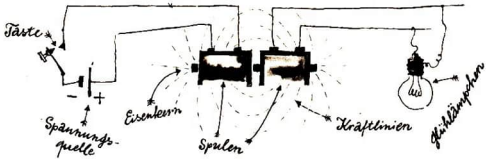
Wechselstrom dagegen läßt sich in sehr einfacher Weise auf höhere und niedere Spannungen umsetzen. Wir brauchen ihn nur einem „Transformator" zuzuführen.

Die Skizze soll uns helfen, seine Wirkungsweise zu verstehen. Zwei Spulen, deren jede einige hundert Drahtwindungen enthalten möge, sind auf einen Eisenkern geschoben, stehen aber miteinander nicht in unmittelbarer Verbindung. Sobald wir die Taste niederdrücken, leuchtet das Lämpchen für einen Augenblick auf; wenn wir die Taste loslassen und damit den Strom durch die linke Spule unterbrechen, erstrahlt es wieder.

Sobald beim Drücken der Taste Strom zu fließen beginnt, wird die linke Spule mit dem eingeschobenen Eisenkern zum Elektromagneten. Ein Magnetfeld bildet sich; es treten Kraftlinien aus dem entstehenden Magneten aus. Sie schneiden die rechte Spule, und infolge der elektromagnetischen Induktion entsteht in ihr eine Spannung, die einen Stromstoß durch das Lämpchen schickt und es aufblitzen läßt.

Sobald sich das Magnetfeld aufgebaut hat, herrscht wieder Ruhe und es „quellen" keine neuen Kraftlinien aus dem Magneten. Die rechte Spule wird infolgedessen auch nicht von weiteren Kraftlinien geschnitten, die Induktionsspannung verschwindet.

Lassen wir die Taste los, so bricht das magnetische Feld zusammen. Seine Kraftlinien kehren in den Magneten zurück, schneiden dabei die rechte Spule noch einmal, und wieder entsteht eine Induktionsspannung.



Legen wir statt Taste und Batterie eine Wechselspannung an die linke Spule, so kommen die Kraftlinien überhaupt nicht mehr zur Ruhe: Je nachdem, ob die Stromstärke zunimmt oder sinkt, „bläht sich" das Kraftfeld auf oder „schrumpft zusammen". Außerdem ändert es – der Stromrichtung entsprechend – fortwährend seine Richtung. Die Folge ist, daß die rechte Spule ununterbrochen von den sich ausbreitenden oder sich zurückziehenden Kraftlinien geschnitten wird. Anstelle von Spannungsstößen entsteht eine Spannung, deren Größe und Richtung sich im Takt des Magnetfeldes ändern. Da dieses aber dem Verlauf des Wechselstromes durch die linke Spule folgt, ist auch die Spannung der rechten Spule eine Wechselspannung.

Das ist das Arbeitsprinzip des Transformators. Ein für die Energieübertragung verwendeter Transformator sieht allerdings ganz anders aus als der skizzierte. Die Stelle des Eisenstabes nimmt der in sich geschlossene Eisenkern ein, auf dessen Schenkeln die beiden Spulen sitzen. Dadurch treten keine Kraftlinien in die Luft aus; sie werden sämtlich zur Erzeugung der Induktionsspannung ausgenutzt. Das Verhältnis der Spannungen in den beiden Spulen entspricht dem Verhältnis der Windungszahlen. Enthält Spule 1 100, Spule 2 dagegen 1000 Windungen, so entsteht in Spule 2 stets eine Induktionsspannung, die zehnfach höher ist als die Spannung an Spule 1. Enthielte Spule 1 500 Windungen, Spule 2 dagegen nur 50, so würde die Spannung durch den Transformator auf $^1/_{30}$ herabgesetzt.

Transformatoren sind immer dort am Platz, wo Wechselspannungen umgewandelt werden sollen: In Rundfunk- und Fernsehgeräten stellen sie die verschiedenen, von den Röhren benötigten Spannungen bereit; für elektromechanische Spielzeuge setzen sie die Netzspannung soweit herab, daß jede Gefährdung der Kinder ausgeschlossen ist.

Im Kraftwerk wird die Generatorspannung durch Transformatoren auf die Übertragungsspannung der Fernleitung gebracht. In den Verbrauchszentren der Elektroenergie wird diese Spannung durch andere Transformatoren wieder vermindert. Das vollzieht sich in mehreren Stufen: In Hauptumspannwerken, die ein größeres Gebiet mit Strom versorgen, wird die Spannung zunächst auf 60000 oder 30000 V herabtransformiert. Nahe den Städten wird nochmals umgespannt (auf 6000 V), und erst in den „Ortsumspannern" (den bekannten Transformatorenhäuschen) werden für ein Stadtviertel oder eine Landgemeinde die Spannungen 380

und 220 V (vereinzelt auch noch 110 V) erzeugt. Durch das mehrfache Umspannen gelingt es, den Strom möglichst verlustfrei zum Verbraucher zu führen, ohne daß es notwendig wäre, das sehr teure Hochspannungsnetz unnötig fein zu verästeln.

Der für die Energieübertragung benutzte Strom ist sogenannter „Dreiphasen-Wechselstrom". Er besteht aus drei einzelnen Wechselströmen, deren jeder die auf S. 232 gezeigte Form hat. Diese Ströme werden in *einem* Generator erzeugt und so zusammengeschaltet, daß für ihre Fortleitung nicht sechs, sondern nur drei oder allenfalls vier Leitungen notwendig sind. Der Bau von Fernleitungen wird dadurch erheblich verbilligt. Auch sonst weist der Dreiphasen-Wechselstrom, oft auch „Drehstrom" genannt, Vorteile auf. Wir können sie hier jedoch nicht näher untersuchen. Merken sollten wir uns aber, daß der Dreiphasen-Wechselstrom keine dritte Stromart neben dem Gleich- und dem Wechselstrom darstellt. Er ist nichts anderes als die geschickte Verkettung von drei „normalen" Wechselströmen.

In den meisten Ländern ist man zum „Verbundbetrieb" übergegangen: Nicht jedes Großkraftwerk hat sein eigenes Leitungsnetz, sondern es gibt *ein* gemeinsames Energieverteilungsnetz, an das sämtliche Kraftwerke angeschlossen sind. Von den Vorteilen dieses Zusammenarbeitens können wir hier nur einige nennen:

Elektroenergie läßt sich nicht in größeren Mengen speichern; sie muß so erzeugt werden, wie sie verbraucht wird. Der Energiebedarf aber schwankt ständig: Er ist im Winter höher als im Sommer, erreicht in den frühen Morgen- und Abendstunden eine „Lastspitze" und sinkt nach Mitternacht auf einen sehr niedrigen Wert. Arbeitete jedes Kraftwerk für sich, so müßte es so leistungsfähig sein, daß es nicht nur die „Spitzenlast", sondern auch einen etwaigen Maschinenausfall decken könnte. Während des größten Teils seiner Betriebszeit aber wäre das Kraftwerk nicht ausgelastet. Es kann aber nur dann wirtschaftlich arbeiten, wenn es möglichst kontinuierlich Energie liefert.

Im Verbundnetz läßt sich leicht ein Ausgleich schaffen: Die modernsten und wirtschaftlichsten Kraftwerke decken den Hauptbedarf, und besondere „Spitzenkraftwerke" springen ein, wenn der Energiebedarf ansteigt oder ein Kraftwerk vorübergehend ausfällt. Pumpspeicherwerke benutzen den nachts reichlich vorhandenen Strom und pumpen hochgelegene Staubecken voll Wasser. In Zeiten hoher Belastung

strömt dieses Wasser nach unten und treibt Turbinen und Generatoren. Man kann im Frühjahr oder im Herbst, wenn die Flüsse reichlich Wasser führen, die volle Leistungsfähigkeit der Wasserkraftwerke nutzen und dadurch Brennstoff für Wärmekraftwerke sparen.

Erst der Verbundbetrieb hat eine rationelle, planmäßige Energieverteilung ermöglicht. Deshalb werden vor allem in den sozialistischen Ländern die Verbundnetze großzügig ausgebaut und erweitert. In wenigen Jahren zum Beispiel werden die großen Energiezentren der Sowjetunion in *einem* Verbundnetz zusammen arbeiten. Dabei treten Entfernungen auf, bei denen die Wechselstromübertragung kaum noch möglich ist. Wahrscheinlich wird hier der „geschmähte Gleichstrom" als Helfer einspringen: Man arbeitet bereits an der Verwirklichung einer Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung, bei der allerdings der Gleichstrom nur auf der Fernleitung fließt, während in den Kraftwerken Wechselstrom erzeugt wird; auch am „Ende" der Leitung erfolgt eine Rückverwandlung des Gleichstromes in Wechselstrom.

Ströme von Energie fließen ununterbrochen in unsere Industriebetriebe, Wohnviertel und landwirtschaftlichen Produktionsgenossenschaften. Sie schaffen eine der Voraussetzungen dafür, daß die Menschen morgen besser leben werden als heute, daß sie planmäßig den Weg zum Sozialismus und zum Kommunismus beschreiten werden.

Sachwortverzeichnis

A

Absorptionskühlschrank 166
Absorptionsspektrum 199
Adhäsionskräfte 84, 100
Akkumulator 218
Ampere 202
Aräometer 15
Arbeit, physikalische 75
Archimedisches Prinzip 109
Asynchronmotor 236
Atmosphäre, physikalische 113
Atmosphäre, technische 30, 114
atmosphärische Strahlenbrechung 184
Auftrieb 109
Außenpolmaschine 234

B

ballistisches Pendel 55
Batterien 215
Beharrungsvermögen 61
Beschleunigung 57
Bewegungsenergie 91
Bildwerfer 191
Bimetallstreifen 126, 212
Blitzlichtstroboskop 70
Bodendruck 107
Brennglas 186
Brillen 193

C

chemische Spannungsquellen 215

D

Dampfmaschine 155
Dampfmaschine, atmosphärische 153
Destillieren 141
Dieselmotor 163
Differentialflaschenzug 48
diffuse Reflexion 174
Dispersion 195
Dissoziation 219
Drehbewegung 65
Dreheiseninstrument 226
Drehspulinstrument 226
Drehstrom 240
Drehzahl 66
Drehzahlmessung 69
Dreiphasen-Wechselstrom 240
Druck 29
Druckfestigkeit 96
Druck in Flüssigkeiten 103
Durchschnittsgeschwindigkeit 55
Düse 118
dynamisches Grundgesetz 64

E

Ebbe und Flut 6
Elastizität 94
Elastizitätsgrenze 95
Elastizitätsmodul 95
elektrischer Strom 201
Elektromagnet 224
elektromagnetische Induktion 230
Elektromotor 227, 234
Elektronen 193, 201
Elektronenmikroskop 192
Emissionsspektrum 198
Energie 90
Energie des Wassers 93
Erhaltung der Energie 78, 148
Erstarrungswärme 137

F

Fallbeschleunigung 59
Fallbewegung 59
Federwaage 9
Fernrohr 190
Fernsprecher 225
feste Rolle 42
Festigkeitslehre 94
Flaschenzug 44
Fliehkraft 71
Fliehkraftbremse 73
Flüssigkeitsheber 100
Frequenz 233

G

Gasmotor 161
Gefrierpunktserniedrigung 138
Generator 231
Geschwindigkeit 53
Geschwindigkeitsmessung 55
Getriebe 46, 68
Gewicht 7
Gleichgewicht, indifferentes 34
Gleichgewicht, labiles 34
Gleichgewicht, stabiles 34
Gleichspannung 232

Gleichstromgenerator 234
Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung 241
gleitende Reibung 84
Glühlampe 212
Goldene Regel der Mechanik 44, 78
Gramm 11
Gravimetrik 7
Gravitationsgesetz 4
Grenzwinkel 183
Grundgesetz, dynamisches 64

H

Haftreibung 84
Halbleiter 204
Hangabtriebskraft 49
Hauptschlußmotor 229
Hebel 35
Hebel, einseitiger 39
Hebelgesetz 35, 38
Hebel, zweiseitiger 38
Heizwert 149
Höhenmesser 113
Hohlspiegel 177
Hookesches Gesetz 94
Hubarbeit 75
hydraulische Kraftübertragung 104
hydraulische Presse 104
hydrostatisches Paradoxon 107
Hypsometer 140

I

Induktion, elektromagnetische 230
Induktionsstrom 231
Infrarot 195
Infrarotstrahlung 130
Innenpolmaschine 234
Ionen 219
Isolatoren 204

K

Kalorie 132
Kältemischungen 138
Kältemittel 165
Kapillarität 102
Keil 28
Kilogramm 11
Kilokalorie 132
Kilopond 8
Kilopondmeter 75
Kilowatt 81, 209
Kilowattstunde 78, 209
kinetische Energie 91
Kohäsionskräfte 97
Kolbendruck 106
Kompressoren 116
Kompressorkühlschrank 165
Kondensationswärme 141, 157
Kondensator 157
Kondensieren 141
Konkavlinsen 186
Konvexlinsen 186
Konvexspiegel 180
Kraft 17
Kraftarm 37
Krafteinheit 18
Kräftemaßstab 19
Kräfteparallelogramm 21, 24
Kraftkomponente 24
Kraftlinien, magnetische 222
Kraftpfeile 19
Kreiselpumpe 74
Kühlschrank 165
Kurbeltrieb 27

L

Lageenergie 90
Lastarm 37
Lastspitze 240
Leistung 80
Leistungseinheit 80
Leiter 204
Leitungselektronen 203
Lichtbrechung 181
Lichtgeschwindigkeit, Messung der 170
Lichtzeiger 176
Licht, Zerlegung des 195
Linsen 186
Lose Rolle 42
Lösungswärme 138
Lot 5
Luftdruck 30, 111
Luftspiegelungen 185

M

Magdeburger Halbkugeln 114
Magnetfeld 221
Magnetismus 221
Masse 11
Massenanziehung 6
mechanische Arbeit 75
mechanisches Wärmeäquivalent 145
Megawatt 209
Metallklebetechnik 101
Mikroskop 191
Millibar 113
Millimeter Quecksilbersäule 113
Molekularkräfte 98
Molekularmagneten 223
Morseapparat 224

N

Nebenschlußmotor 229
neutrale Schicht 96
Normalkraft 49
Nullschicht 96
Nutzarbeit 87
Nutzleistung 87

O

Oberflächenspannung 99
Ohm 207
Ohmsches Gesetz 208
Ottomotor 161, 163

P

Pendel 91
Pendel, ballistisches 55
Perpetuum mobile 149
Pferdestärke 80
physikalische Arbeit 75
physikalische Atmosphäre 113
plastische Stoffe 96
Pond 8
potentielle Energie 90
Prismenfernrohr 191

Protonen 201
Pumpen 115
Pumpspeicherwerk 240

R

Radialkraft 71
Reflexion, diffuse 174
Reflexionsgesetz 174
Regenbogenfarben 196
Reibung 62, 83
Reibung, gleitende 84
Reibungskoeffizient 84
Reibungswiderstand 83
Resultierende 21
Rollen 41
Rolle, feste 42
Rolle, lose 42
Rollreibung 85

S

Sammler 218
Schärfentiefe 188
schiefe Ebene 49
Schmelzsicherung 211
Schmelzwärme 136
Schmelztemperatur 135
Schmiermittel 85
Schnellwaage 37
Schnittgeschwindigkeit 66
Schweredruck 106, 118
Schwerkraft 7
Schwerpunkt 32
Sehwinkel 189
Seilwinde 45
Seismograph 63
Seitendruck 107
Senkspindel 15
Sextant 177
Siedepunkt 139
Spannung 205
Spannungsquelle, chemische 215
Spannungsquellen 205
Spektralanalyse 197
Spektrometer 198
Spektrum 195
spezifische Wärme 133
spezifischer Widerstand 207
Spiegel 174
Spiegelreflexkamera 175
Spitzenkraftwerk 240
spröde Stoffe 96
Standfestigkeit 33
statischer Druck 119
Staudruck 118
Stempeldruck 106
Strahlenbrechung, atmosphärische 184
Stroboskopmethode 69
Strom, elektrischer 201
Stromrichtung, technische 206
Stromstärke 202
Strömungslehre 117
Synchronmotor 235

T

Tachometergenerator 69
technische Atmosphäre 30, 114
Temperatur 123
Thermometerfestpunkte 124
Torr 113
Totalreflexion 183
Trägheit 61
Trägheitsgesetz 61
Trägheitskräfte 64
Transformator 238

U

Übersetzungen 67
Umfangsgeschwindigkeit 66

V

Verbrennungskraftmaschinen 160
Verbrennungswärme 150
Verbundbetrieb 240
verbundene Gefäße 107
Verdampfungswärme 139
Verdunsten 142
Verdunstungskälte 143
Vergrößerungsglas 186
Verzögerung 57
Vididose 113
Viertaktmotor 161
Volt 206

W

Waage 36
Wärmeäquivalent, mechanisches 145
Wärmeausdehnung 124
Wärmeausdehnungszahl 125
Wärmeleitung 128
Wärmeleitzahl 128
Wärmemenge 132
Wärmepumpe 167
Wärme, spezifische 133
Wärmestrahlung 130
Wärmeströmung 129
Wärme und Arbeit 144
Wärmewirkungen des Stromes 210
Warmwasserheizung 130
Wasserräder 120
Wasserstrahlluftpumpe 120
Wasserturbinen 121
Watt 81, 209
Wattstunde 209
Wechselstrom 232
Wechselstrommotor 234
Weltraumfahrt 65
Wichte 13
Widerstand 207
Widerstand, spezifischer 207
Winde 45
Wirkungsgrad 87
Wölbspiegel 180
Wucht 91
Wurfhebel 41

Z

Zahnradgetriebe 46
Zentrifugalkraft 71
Zentrifugalregulator 73
Zentrifugen 73
Zentripetalkraft 71
Zerlegung des Lichtes 195
Zerreißfestigkeit 95
Zink-Kohle-Element 216
Zweitaktmotor 163
Zyklon 74

Inhalt

5 Die Erde läßt uns nicht los
9 Zuckertüte auf Reisen
12 Heureka!
17 Vom Spiel der Muskeln
19 Geometrie muß sein
23 Kräfteparallelogramm – andersherum!
29 Zwischen Schneeschuh und Raupenschlepper
32 Von der Kunst des Balancierens
35 Und wieder Archimedes
41 Parade der Rollen
44 Das Hebelgesetz reicht weiter!
49 Bergauf und bergab
53 Geschwindigkeitsmessung ist keine Hexerei!
57 Zwischen Achterbahn und Weltraumschiff
60 Trägheit – physikalisch gesehen
65 Alles dreht sich
71 Es wird weitergedreht
75 Arbeit – wie der Physiker sie sieht
79 Es geht um Sekunden
82 Vorsicht! Frisch gebohnert!
87 Kampf um Prozente
89 Physik an der Kuckucksuhr
93 Auf Biegen und Brechen
97 Wenn die Kleinen zusammenhalten

103 Vom flüssigen Hebel zur Wasserleitung
109 Noch einmal Archimedes
111 Wetterbericht, Tomatensaft und Fahrradpumpe
117 Was da fließt und strömt . . .

123 Zwischen warm und kalt
127 Wärme geht mancherlei Wege
131 Die Temperatur erhält Gesellschaft
134 Stoffe zwischen kalt und heiß
138 Zwischen Topf und Deckel
143 Was Wärme wert ist
149 Zwischen Kohlenkeller und Ascheneimer
152 Püsterich und seine Enkel
159 Takte, Kolben und Zylinder
164 Heizen Sie mit kaltem Wasser!

169 Meßstrecke im Weltall
173 Der Blick in den Spiegel
180 Der geknickte Löffel und die Rodelbahn
186 Linsen, nichts als Linsen
194 Detektiv Licht
201 Elektronen unterwegs
204 Die drei Unzertrennlichen
210 Wärme aus der Steckdose
215 Das Kraftwerk im Zellophanbeutel
221 Oerstedts große Entdeckung
225 Nur eine einfache Regel
229 Mit dem Stabmagneten fängt es an . . .
236 Energie strömt durch das Land

243 Sachwortverzeichnis

1. Auflage 1.–25. Tausend. Alle Rechte vorbehalten
Copyright 1961 by Urania-Verlag,
Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig/Jena/Berlin
VLN 212-475/87/61 · ES 18 B 1
Illustrationen, Einband und Schutzumschlag: Heinz Bormann
Typographie: Walter Schiller
Satz: VEB Graphische Werkstätten, Leipzig
Lithographie: Meißner & Buch, Leipzig
Druck: Sachsendruck, Plauen
Buchbinderei: E. P. Berger, Leipzig
Printed in the German Democratic Republic