

PHYSIK SELBST ERLEBT



HANS BACKE

EXPERIMENTIERBUCH



Die gesetzlichen physika

Länge		Zeit	Masse	
m	Meter	s	kg	Kilogramm
1 sm = 1 Seemeile = 1852 m	*	1 min = 1 Minute = 60 s	1 g = 1 Gramm = 10 ⁻³ kg	DYNAMISCHE VISKOSITÄT:
FLÄCHE:		1 h = 1 Stunde = 60 min = 3600 s	1 t = 1 Tonne = 1000 kg	1 Ns/m ² = 1 Newton- sekunde/ Quadratmeter
1 m ² = 1 Quadratmeter * = 1 m · 1 m	*	1 d = 1 Tag = 24 h = 86 400 s	1 k = 1 metrisches Karat = 0,2 g	1 P = 1 Poise = 10 ⁻¹ Ns/m ²
1 a = 1 Ar = 100 m ²	*	FREQUENZ:	DICHTE:	KINEMATISCHE VISKOSITÄT:
1 ha = 1 Hektar = 100 a	*	1 Hz = 1 Hertz = 1 Schwingung/ Sekunde	1 kg/m ³ = 1 Kilogramm/ Kubikmeter	1 m ² /s = Quadratmeter/ Sekund
VOLUMEN:		1 $\frac{U}{s}$ = 1 Hz (Umdrehung je Sekunde).	KRAFT:	1 St = 1 Stokes = 10 ⁻⁴ Ns/m ² = $\frac{1 \text{ kg/m}^3}{s}$ = 10 ⁻⁴ m ² /s
1 m ³ = 1 Kubikmeter = 1 m · 1 m · 1 m	*	1 $\frac{U}{\text{min}}$ = $\frac{1}{60} \frac{U}{s}$	1 N = 1 Newton = 1 kg m/s ²	
1 l = 1 Liter = 1,000 028 · 10 ⁻³ m ³	*	1 $\frac{U}{h}$ = $\frac{1}{60} \frac{U}{\text{min}}$	1 dyn = 1 Dyn = 10 ⁻⁵ N	ARBEIT, ENERGIE UND WÄRMEMENGE:
GESCHWINDIGKEIT:			1 kp = 1 Kilopond = 9,806 65 N	1 J = 1 Ws = 1 Nm = 1 Joule = 1 Wattsekunde = 1 Newtonmeter
1 m/s = 1 Meter/Sekunde	*		1 p = 1 Pond = 10 ⁻³ kp	
1 kn = 1 Seemeile/Stunde	*		DRUCK:	1 erg = 1 Erg = 10 ⁻⁷ J
BESCHLEUNIGUNG:			1 N/m ² = 1 Newton/ Quadratmeter	1 cal = 1 Kalorie = 4,1868 J
1 m/s ² = 1 Meter/Quadratsekunde	*		1 bar = 1 Bar = 10 ⁵ N/m ²	LEISTUNG:
1 Gal = 10 ⁻² m/s ² = 1 cm/s ²			1 at = 1 techn. Atmosphäre = 1 kp/cm ²	1 W = 1 Watt = 1 J/s
				1 PS = 1 Pferdestärke = 75 kpm/s
			1 atm = physik. Atm. = 101 325 N/m ²	1 VA = 1 Voltampere (elektr. Strom- leistung)
			1 Torr = 1 Torr = 1/760 atm	1 var = 1 Var = 1 W (elektr. Blind- leistung)

isch-technischen Einheiten

Elektr. Stromstärke	Temperatur	Lichtstärke	Winkel
A Ampere	K Kelvin	cd Candela	
ELEKTRISCHE SPANNUNG: $1 \text{ V} = 1 \text{ Volt}$ $= 1 \text{ W/A}$	CELSIUS-TEMPERATUR: $1^\circ \text{C} = 1 \text{ Grad Celsius}$ $0^\circ \text{C} = 273,15 \text{ K}$	LEUCHTDICHTE: $1 \text{ cd/m}^2 = 1 \text{ Candela/Quadratmeter}$	EBENER WINKEL: $1 \text{ rad} = 1 \text{ Radian}$
ELEKTRISCHER WIDERSTAND: $1 \Omega = 1 \text{ Ohm}$ $= \text{V/A}$		$1 \text{ sb} = 1 \text{ Stilb}$ $= 10^6 \text{ cd/m}^2$	$1 \text{ L} = 1 \text{ Rechter}$ $= \frac{\pi}{2} \text{ rad}$
ELEKTRISCHER LEITWERT: $1 \text{ S} = 1 \text{ Siemens}$ $= 1 \text{ A/V}$		LICHTSTROM: $1 \text{ lm} = 1 \text{ Lumen}$ $= 1 \text{ cd sr}$	$1^\circ = 1 \text{ Grad}$ $= 1/90 \text{ L}$
ELEKTRIZITÄTS-MENGE: $1 \text{ C} = 1 \text{ As} = 1 \text{ Coulomb}$ $= 1 \text{ Amperesekunde}$		BELEUCHTUNGS-STÄRKE: $1 \text{ lx} = 1 \text{ Lux}$ $= 1 \text{ lm/m}^2$	$1' = 1 \text{ Minute}$ $= 1/60^\circ$
ELEKTRISCHE KAPAZITÄT: $1 \text{ F} = 1 \text{ Farad}$ $= 1 \text{ C/V}$			$1'' = 1 \text{ Sekunde}$ $= 1/60'$
ELEKTRISCHE VERSCHIEBUNG: $1 \text{ C/m}^2 = 1 \text{ Coulomb/Quadratmeter}$			$1 \text{ g} = 1 \text{ Neugrad}$ $= 1 \text{ Gon}$ $= 10^{-2} \text{ L}$
ELEKTRISCHE FELDSTÄRKE: $1 \text{ V/m} = 1 \text{ Volt/Meter}$			$1 \text{ c} = 1 \text{ Neuminute}$ $= 10^{-2} \text{ g}$
MAGNETISCHER FLUSS: $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} = 1 \text{ Weber}$ $= 1 \text{ Voltsekunde}$		Im Kopf der Tabelle stehen die Grundeinheiten.	$1 \text{ cc} = 1 \text{ Neusekunde}$ $= 10^{-2} \text{ c}$
INDUKTIVITÄT: $1 \text{ H} = 1 \text{ Henry}$ $= 1 \text{ Wb/A}$		In diesen Feldern stehen die kohärenten Einheiten.	RAUMWINKEL: $1 \text{ sr} = 1 \text{ Steradian}$
MAGNETISCHE INDUKTION: $1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ Vs/m}^2$ $= 1 \text{ Weber/Quadratmeter}$ $= 1 \text{ Voltsekunde/Quadratmeter}$		In diesen Feldern stehen die inkohärenten Einheiten.	WINKELGESCHWINDIGKEIT: $1 \text{ rad/s} = 1 \text{ Radian/Sekunde}$
MAGNETISCHE FELDSTÄRKE: $1 \text{ A/m} = 1 \text{ Ampere/Meter}$		Nur bedingt zugelassene Einheiten.	WINKELBESCHLEUNIGUNG: $1 \text{ rad/s}^2 = 1 \text{ Radian/Quadratsekunde}$

* Die Bildung von Vielfachen und Teilen mit den gesetzlichen Vorsätzen (s. Seite 44) ist nicht zulässig!

° Die Bildung von Quotienten aus Vielfachen und Teilen des betreffenden Dividenden und des Divisors bzw. die Bildung von Quotienten der zulässigen Einheiten der Definitionsgrößen ist zulässig.

HANS BACKE



Das kannst auch Du

DAS PHYSIK-EXPERIMENTIERBUCH

Physik selbst erlebt



URANIA-VERLAG LEIPZIG · JENA · BERLIN

5. Auflage 1975, 41.—60. Tausend.

Alle Rechte vorbehalten.

© Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin,

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig, 1963

VLN 212-475/67/75

LSV 110 9

Lektor: Manfred Quaas

Illustration und Einband: Wolfgang Würfel und Rudolf Skribelka

Typografie: Helmut Selle

Fotos: Tabbert/Dewag — Dresden

Satz und Druck: Gutenberg Buchdruckerei und Verlagsanstalt, 53 Weimar,
Marienstraße 14

Buchbinderei: Südwest, Leipzig

Best.-Nr. 653 1704

EVP 14,80 Mark

*Was ist das Schwerste von allem?
Was dir das Leichteste dünkt:
Mit den Augen zu sehen,
Was vor den Augen dir liegt.
(Goethe, Xenien)*

Vom törichten und vom klugen Menschen

Es sollte nicht schwierig sein, bei guter Beleuchtung etwas zu sehen, was einem vor den Augen liegt – aber sehen und sehen ist zweierlei. Ein Mensch kann eine Sache oder eine Bewegung zur Kenntnis nehmen, ohne daß seine Gedanken dadurch im geringsten bewegt werden; er registriert bestenfalls. Dieser Mensch steigt aus der noch nicht haltenden Straßenbahn gegen die Fahrtrichtung aus, fällt auf den Rücken und ärgert sich – über die Bahn. Er schaltet Heizofen, Bügeleisen und Elektrokocher zur gleichen Zeit ein – und ist über die durchbrennende Sicherung empört. Um sich abzulenken, schenkt er sich Kaffee aus einer Kanne mit luftdicht schließendem Deckel ein. Dem leichten Gerinnsel, das er vorsichtig in seine Tasse lenkt, folgt urplötzlich ein dicker Kaffeestrahler, der sich mit viel Schwung auf die Tischdecke ergießt. „Diese verflixte Kanne!“ wird unser Freund zetern, aber er wird die Schuld niemals in seiner Denkfaulheit suchen.

Von solcher Gedankenlosigkeit, vom Leben ohne Denken, gibt es noch unendlich viele Beispiele. Denken setzt jedoch (unter anderem) Erfahrungen und Wissen voraus. In der Frühzeit fehlte es dem Menschen noch zwangsläufig daran; damals halfen ihm die Instinkte. Die Tiere, die ja nicht denken können, leben auch heute vor allem mit Hilfe der Instinkte. Der Mensch aber ist kein instinkt-sicheres Tier, sondern ein mit einem erstaunlich entwicklungsfähigen Denkvermögen begabtes Lebewesen. Freilich muß er sich aber auch die Mühe des Entwickelns machen!

Wir leben heute in einer Welt, die technisch so vielfältig ist, daß das jedem Menschen bewußt wird. Die Art, wie er nun reagiert, ist entsprechend den gesellschaftlichen Verhältnissen, unter denen er lebt und die seine Verhaltensweise entscheidend beeinflussen, sowie je nach seiner Bildung und seiner Weltanschauung freilich sehr verschieden. Der eine verzagt, lobt die „gute alte Zeit“ (verlangt aber elektrisches Licht, Kraftwagen und WC), sieht in der Technik einen Dämon, der die Menschen versklavt – kurz, Lebensangst befällt ihn; er glaubt nicht an die Zukunft.

Der andere Mensch glaubt an die Zukunft, er sieht in der Technik das vom Menschen geschaffene Mittel, die Arbeit und das Leben zu erleichtern und





in jeder Weise zu verbessern. Er steht dem Leben in all seinen Erscheinungsformen bejahend gegenüber und bemüht sich, es zu beherrschen, indem er es versteht.

Kein Mensch kann heute noch alles wissen. Niemand verlangt, daß wir ein wandelndes Lexikon sein sollen; das wäre auch auf die Dauer für alle Beteiligten langweilig. Verstehen – darum geht es uns – heißt vielmehr, einer ausreichenden Zahl von Naturgesetzen auf die Spur kommen und die Verbindung zwischen den Erscheinungen im täglichen Leben und diesen Naturgesetzen herstellen. Wir merken dann sehr bald, daß jedes dieser Gesetze in unzähligen Fällen wirksam ist; aus seinem scheinbaren Nebeneinander der zahllosen Einzelercheinungen werden die Zusammenhänge sichtbar; Ähnlichkeiten, Beziehungen, Verflechtungen werden deutlich – es entsteht schließlich ein Gebäude von „Bauelementen des Wissens“.

Das Naturgesetz zeigt den in der Natur existierenden und wirksamen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung der Erscheinungen und Kräfte. Jeder kennt eine Reihe solcher Naturgesetze: das Hebelgesetz zum Beispiel. Der Mensch, der die Naturgesetze kennt, weiß, warum die Dinge so und nicht anders sind und wirken; er kann voraussehen, was unter bestimmten Voraussetzungen geschehen wird.

Wichtig ist bei alledem eines: Wir müssen etwas wirklich wissen, nicht nur vermuten oder glauben; erst dann können wir damit etwas anfangen. Und da hat der Mensch glücklicherweise ein zuverlässiges Mittel zum Prüfen: das Experiment, den Versuch, manchmal auch „Frage an die Natur“ genannt. Es ist ein bewährter Weg, den Naturgesetzen auf die Spur zu kommen.

Wenn wir ein Naturereignis, beispielsweise ein Gewitter oder einen Wasserfall, beobachten oder wenn wir zuschauen, wie ein Kind mit einem Schlitten einen Hang hinabrodeln, so experimentieren wir noch nicht. Erst wenn wir die Naturerscheinung nachahmen, wenn wir die Fahrzeit und die Wegstrecke beim Rodeln messen, dann erst sind das Experimente. Beobachten wird dabei groß geschrieben; nicht weniger aber das Denken. Wir müssen aus dem körperlichen Geschehen vor unseren Sinnen eine ganz unkörperliche, eine geistige Erkenntnis „herausdenken“. Abstrahieren nennt man diesen Vorgang – vom lateinischen *abstrahere* = wegziehen. Wir ziehen den Schleier von dem Geheimnis der Natur weg!

Keine Naturforschung kann ohne das Experiment auskommen; es ist das wichtigste Arbeitsverfahren – sei es, daß man durch das Experiment überhaupt erst auf die Zusammenhänge, auf Ursache und Wirkung kommt, sei es, daß man ein geistvoll erdachtes Naturgesetz mit Hilfe des Versuches auf seine Richtigkeit prüft. Beobachten und denken muß man in jedem Falle; am wertvollsten aber sind die Versuche, bei denen wir messen – die „quantitativen“ Versuche (im Gegensatz zu den „qualitativen“, bei denen man einen Ablauf ohne Messung beobachtet). Nur die quantitativen Versuche führen zum Naturgesetz mit voller Aussagekraft: zur mathematischen Gleichung. Und so wie die Physik die „Schlüsselwissenschaft“ für alle übrigen Naturwissenschaften ist, so wird sie selber immer mehr von der Mathematik durchdrungen. Vor allem da, wo unser Vorstellungsvermögen

versagt, hilft uns dann die Mathematik weiter – ein sicherer Weg im Abstrakten.

Nicht ohne Grund hat das Experiment diese beherrschende Stellung erlangt. Es bietet gegenüber der bloßen Beobachtung außerordentliche Vorteile: Wir können einen Gesamtvorgang in Teilvorgänge zerlegen, diese einzeln viel genauer untersuchen und dann wieder zusammensetzen; wir können die Größenordnungen (Maßstäbe) verändern, das heißt die Dinge und die Zeit vergrößern oder verkleinern. Wir können den Zeitpunkt bestimmen, an dem alles ablaufen soll; wir können einen Versuch meist beliebig oft durchführen, um einen guten Mittelwert zu erhalten, und schließlich können wir mit allerlei bewährten Hilfsmitteln arbeiten: Mikroskop, Zeitlupenfilm, Zeitrafferfilm, sehr genauen Meßeinrichtungen für Größen jeder Art einschließlich der Zeit. Das ist eine Reihe der bedeutendsten Vorzüge des Experiments als eines Verfahrens, Erkenntnis zu gewinnen.

Auch wir wollen versuchen, mit einfachen Mitteln einige Experimente zu machen, die uns Vergessenes in Erinnerung bringen, die uns viel Neues geben und uns zeigen, warum dieser oder jener Vorgang so und nicht anders verläuft. Es macht Spaß, wenn man nicht nur die großen, sondern auch gerade die kleinen Ereignisse logisch erklären kann. Glücklicherweise macht das Experimentieren viel Vergnügen, auch für die Zuschauer. Wir müssen nur Geduld haben und stets sauber arbeiten, damit kein Kampf mit der „Tücke des Objekts“ ausbricht.

Unsere Experimente sind im allgemeinen nicht gefährlich. Trotzdem wollen wir auf die Unfallwarnungen sehr sorgfältig achten.

Wir brauchen durchaus nicht alles der Reihe nach durchzunehmen. Naschen wir getrost einmal hier und einmal dort – mit der Zeit finden wir den Anschluß, wir bekommen die großartige Übersicht und merken: Die physikalischen Gesetze wirken in allen Bereichen unseres Lebens.

Und wer nun die Physik in einigen Teilen wirklich erleben will – der muß nicht nur mit dem Kopf, sondern auch mit seinen eigenen Händen seine Erkenntnisse erarbeiten. Wir wollen ja nicht etwas glauben, sondern es wissen; deshalb müssen wir uns durch eigene Anschauung der Dinge und der Geschehnisse selbst überzeugen.





Kräfte und Wirkungen

Scherben bringen Glück

Patschkliirr – da liegt die große Porzellanschüssel in Scherben auf dem Boden der Küche! Die Hausfrau steht mit nassen Händen erschrocken davor; sie ist gerade beim Abwaschen.

Ob Scherben wirklich Glück bringen? Oder sagt man das, um sein seelisches Gleichgewicht schneller wiederzufinden? Sicherlich! Einigen Leuten freilich bringen Scherben doch Vorteile: den Herstellern und Verkäufern der Dinge, die nun ersetzt werden müssen. Aber viel größere Vorteile kann ein solcher – an sich peinlicher – Vorfall, ein richtiger „Fall“, uns beschaffen, wenn wir ihn mit den Augen des Physikers betrachten.

Wir wollen wissen, was da alles an Kräften tätig war, bis die Scherben am Boden lagen. Ein erster Überblick ergibt: Fallgesetz, Erdanziehung, Bewegung, Reibung (davon zuwenig), Trägheit, Festigkeit (an der es auch mangelte). Das ist vielleicht etwas viel für den Anfang – aber es ist um so reizvoller. Der freie Fall ist außerdem eines der häufigsten Ereignisse im täglichen Leben.

Einiges zum Fallgesetz

Der Vorgang, bei dem ein Gegenstand fällt, ist schon sehr früh beobachtet und auch untersucht worden; im Laufe der Zeit ändert sich die Betrachtungsweise dabei erheblich. Der griechische Naturphilosoph Aristoteles (384 bis 322 v. u. Z.) erledigte das beispielsweise durch Nachdenken, durch logisches Folgern (sogenannte Deduktion). Experimente im heutigen Sinne kannte er nicht. Er lebte in der Sklavenhalterzeit und gehörte zur herrschenden Klasse. Zu Experimenten mußte man seine Hände gebrauchen – das aber war Sache der Sklaven.

Selbstverständlich hat Aristoteles beobachtet, daß ein Stein schnell herabfiel, ein Blatt eines Baumes dagegen erheblich langsamer – vielleicht dabei hin- und herschaukelnd – zu Boden sank; er mag einem solchen Vorgang auch gelegentlich nachgeholfen haben. Aristoteles war einer der klügsten

Menschen, die je gelebt haben, und er war infolgedessen sehr wissensdurstig. Er fragte sofort: *Warum fällt ein Ding?*

Das Ergebnis seines Nachdenkens war eine (jedenfalls für seine Zeitgenossen) bestechende Theorie: Es gibt zwei Arten von Bewegung; erstens die erzwungene, bei der eine Kraft von außen auf den Körper wirkt, und zweitens die „natürliche“ Bewegung. Bei dieser wirkt, so meinte Aristoteles, ein Trieb, der im Gegenstand sitzt und ihn an seinen „natürlichen Ort“ als Endziel bringt – die schweren Körper zur Erde, das leichte Element (das Feuer) aufwärts in die Mondsphäre. Die schweren Körper haben also nach dieser Hypothese einen Falltrieb.

Hypothese (aus dem Griechischen) heißt eigentlich „Untergeschobenes“. Jeder Forscher braucht solche Hypothesen bei seiner Arbeit. Er untersucht eine Erscheinung experimentell und deutet sie, das heißt, er spricht eine *Vermutung* aus, wie die Erklärung lauten könnte. Er übersetzt gewissermaßen das materielle Geschehen des Experiments, das vor ihm abläuft, ins Geistige – in der Form einer mathematischen Gleichung, einer Regel oder einer feststehenden Zahl (einer Konstanten, eines Koeffizienten). Man nennt diese sehr wichtige Arbeitsweise *induktives Verfahren*. Das Wort kommt vom lateinischen *inducere* = hineinführen; man führt vom Einzelfall in das allgemeingültige Gesetz hinein.

Der umgekehrte Fall ist das deduktive Verfahren (*deducere* = wegziehen); man geht von dem Gesetz, der Regel usw., also dem Allgemeingültigen aus und wendet die darin steckende Erkenntnis auf einen Einzelfall an. Auf solche Weise prüft man zum Beispiel die Richtigkeit eines Gesetzes in verschiedenen Bereichen; man kann da gar nicht vorsichtig genug sein! Es gibt Gesetze, die in ihrem funktionalen (= in ihren einzelnen Teilen zusammenhängenden) Ablauf einen plötzlichen „Knick“ zeigen; die „Anomalie“ des Wassers, seine Ausdehnung bei Temperaturen unter 4 °C, ist dafür ein Beispiel.

Bei dem deduktiven Verfahren muß man also schon einigermaßen über das Naturgesetz im Bilde sein – am besten natürlich auf Grund vorhergegangener Versuche. Aristoteles hatte diese systematischen Versuche leider nicht gemacht, sondern „spekulierte“ auf der Grundlage eines nicht geprüften Urteils. Dieses spekulative Verfahren führt leicht zu Fehlschlüssen.

Aristoteles schloß haarscharf, aber leider falsch: Je schwerer ein Körper ist, um so schneller fällt er. Er würde unendlich schnell fallen, wenn nicht die Reibung mit der Luft die Geschwindigkeit herabsetzte.

Rund 2000 Jahre hindurch haben sich diese und andere falsche Lehren dank der Autorität eines Aristoteles und anderer Philosophen gehalten, von der Kirche nachdrücklich mit Prozessen, Ketzerverbrennungen usw. unterstützt. Lange Zeit hindurch war es lebensgefährlich, diese Lehren anzuzweifeln; nicht einmal die experimentellen Beweise für neue, andere Meinungen wurden zur Kenntnis genommen. Eine Kritik an der alten Lehre war Ketzerei, und mancher – wie Giordano Bruno – mußte dafür sein Leben lassen. Das müssen wir auch bedenken, wenn wir die Leistung und das Verdienst derjenigen richtig einschätzen wollen, die uns die neue Lehre von der Wirklichkeit der Natur brachten! Nicht nur Erfahrungen und Ein-



richtungen zum Experimentieren fehlten noch, sondern auch die Furcht vor der allmächtigen Kirche mußte überwunden werden. Forscher wie Nikolaus Kopernikus (1473 bis 1543), Galileo Galilei (1564 bis 1642) und Johannes Kepler (1571 bis 1630) begründeten das System der echten Naturwissenschaft Physik; zu ihnen gehört auch Isaak Newton (1643 bis 1727, Engländer, „Njut'n“ ausgesprochen), der 1687 die Dynamik – die Lehre von der Bewegung in der Mechanik – mathematisch untersuchte und aufstellte.

Diese Männer lösten sich von den alten Ideen und brachen die Autorität des Aristoteles; sie beseitigten die Unantastbarkeit seiner Lehre und bahnten den Weg für eine vorurteilsfreie physikalische Forschung.

Auch unser Problem mit der fallenden Schüssel ist dabei; und wir wissen es heute: Die Weltkörper unseres Sonnensystems bewegen sich nach demselben Gesetz, nach dem unsere Schüssel zu Boden gefallen ist! Ist das nicht eine großartige Erkenntnis?

Galilei stellte die Frage nach dem Fall so: Wie bewegt sich ein fallender Körper? Wie ist der Zusammenhang (die Funktion) zwischen dem Fallweg und der Fallzeit? Galilei soll vom Schiefen Turm zu Pisa aus viele Fallversuche durchgeführt und dabei das Fallgesetz gefunden haben.

Ob das stimmt oder nicht – wir verbinden mit dem Namen Galilei den Beginn der experimentellen Forschung in der Physik und wissen, daß Galilei mit Hilfe des Pendels und der geeigneten Ebene experimentierend das richtige Fallgesetz gefunden hat, wobei er die Zeit mit Hilfe eines tropfenden Wassereimers maß. Zunächst glaubte er, daß die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers mit der Länge des zurückgelegten Weges wächst; durch unverdrossenes Experimentieren kam er schließlich dahinter, daß die Geschwindigkeit mit der Fallzeit ansteigt. Wir erinnern uns: Wir erhalten die Geschwindigkeit einer geradlinigen gleichförmigen Bewegung, wenn wir den zurückgelegten Weg durch die zugehörige Zeitspanne teilen. Ihre Dimension ist Länge durch Zeit, die Maßeinheit $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Danach konnte Newton folgendes System aufstellen:

1. Es gibt keinen Fall- oder Steigtrieb und keinen Unterschied zwischen natürlicher und erzwungener Bewegung; die Ursache der Fallbewegung ist – ebenso wie die der Bewegung der Planeten im Weltall – die Anziehungskraft, die jede Materie auf eine andere ausübt.
2. Wirkt eine gleichbleibende Kraft dauernd auf einen Körper ein, so wird dessen Geschwindigkeit dauernd gleichmäßig beschleunigt.
3. Sobald diese Einwirkung aufhört, behält der Körper die zuletzt erreichte Geschwindigkeit – so lange, bis wieder eine Kraft auf ihn einwirkt. (Das kann beispielsweise die Reibung an einem anderen Körper sein.)

Galilei fand, daß alle Körper in gleicher Weise beschleunigt fallen. Genauer gesagt, sie haben am gleichen Ort die gleiche Fallbeschleunigung. Es ist nämlich nicht gleichgültig, ob wir unsere Schüssel in Berlin oder etwa auf dem 6310 m hohen Gipfel des Chimborazo fallen lassen – auf dem Berg fällt

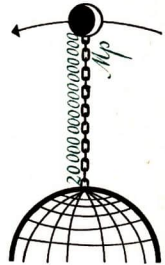


sie langsamer. Das hängt damit zusammen, daß die Entfernung der beiden Massen, der Erde und der Schüssel (immer von ihren Mittelpunkten gerechnet), eine große Rolle spielt. Außerdem ist die Größe der Anziehung zwischen zwei Massen von deren Größe abhängig. Die Erde zieht alle Dinge an; das ist unsere erste wichtige Erkenntnis. Und wer nun meint, die Dinge müßten auch die Erde anziehen, der hat tatsächlich recht. Aber die Masse der Dinge ist im Verhältnis zu der der Erde so gering, daß sie im wahrsten Sinne des Wortes nicht „ins Gewicht fällt“. Zum Vergleich einige Zahlen: Zwei nebeneinanderstehende mittelgroße Personen ziehen einander (physikalisch!) mit einer Kraft an, die etwa gleich dem fünfzigtausendsten Teil des Gewichts eines Pfennigstücks (ein Pfennigstück wiegt 0,76 p) ist. Zwei nebeneinander im Hafen liegende große Fahrgastschiffe bringen es immerhin auf etwa 1 kp gegenseitiger Anziehungskraft; die große Gegenkraft der Wasserreibung verhindert aber eine nachweisbare Bewegung.

Wenn sich der Abstand zwischen den Schiffen trotzdem verringert, so sind Wasserströmungen die Ursache. Sehr groß ist die gegenseitige Massenanziehung zwischen Erde und Mond: etwa 20000 Billionen Mp. Sie entspricht etwa der Zugfestigkeit eines Drahtseils von 600 km Durchmesser!

Ohne die Anziehungskraft würde die Fliehkraft (denn die Erde dreht sich ja sehr schnell) alles auf der Erde, auch uns, in den Weltraum schleudern. Nun — die Anziehungskraft ist da und wird auch bleiben. Wir sind an diese „Schwerkraft“ gewöhnt und lesen, welche Riesenkräfte nötig sind, um ein Weltraumschiff aus dem Kraftfeld der Erde herauszubringen. Bei größeren Planeten ist die Anziehungskraft entsprechend stärker; auf dem Jupiter hätten wir Mühe, uns kriechend vorwärts zu bewegen. Umgekehrt ist es auf dem Mars, dem kleineren Planeten, oder gar auf dem Mond: Hier könnten wir leicht große Sprünge machen. Ein Mensch — auf der Erde 60 kp schwer — wiegt auf dem Mond nur noch etwa 10 kp!

Aber zurück zum Fall. Die Erdanziehung, nach dem lateinischen Wort *gravitas* für Schwere auch Gravitation genannt, wirkt als Kraft ständig und gleichmäßig auf einen fallenden Körper ein. Wie stark sie einwirkt, das hängt, wie wir wissen, nicht zuletzt von der Größe der anziehenden Masse ab; jede Masse hat also sozusagen ihre eigene (das heißt ihrer Größe entsprechende) ganz bestimmte Kraft, mit der sie die Dinge zu sich zieht und beim Fallen beschleunigt. Als man das begriffen hatte, ging man sofort daran, die Größe dieser Kraft für unsere Erde möglichst genau zu bestimmen; auch Galilei tat das. Diese Aufgabe ist reizvoll; wir wollen sehen, was wir durch Experimente erreichen können.



Die Reibung mit der Luft beeinflusst die Fallgeschwindigkeit

Dieser Versuch ist sehr einfach und trotzdem physikalisch sehr wichtig. Wir lassen ein Blatt Papier oder Stanniol sowie einen kleinen, schweren Gegenstand (Taschenmesser, Radiergummi oder dergleichen, nicht zerbrechlich!) zur selben Zeit fallen. Das Blatt schwebt, hin- und herschwingend, mit an-

nähernd gleichbleibender Geschwindigkeit hinab; der schwere Gegenstand fällt — und zwar am Ende zweifellos schneller als am Anfang, also beschleunigt.

Hier scheint ein Widerspruch zu unserem Fallgesetz vorzuliegen, demzufolge alle Körper mit der gleichen Beschleunigung (hier am selben Ort) fallen. Wir untersuchen diesen Widerspruch mit einer Abwandlung des Versuches: Wir knüllen das Papier- oder Stanniolblatt so klein wie möglich zusammen und lassen es mit unserem schweren Körper gleichzeitig fallen. Beide fallen jetzt mit der gleichen Beschleunigung und haben, miteinander verglichen, zu jedem Zeitpunkt die gleiche Geschwindigkeit; das Gesetz ist erfüllt. Der Unterschied der beiden Versuchsergebnisse kann nicht am Stoff Papier oder Stanniol liegen, denn der ist derselbe geblieben. Geändert wurde jedoch die Form des Blattes; da muß die Ursache stecken. Die Erde will das Blatt mit wachsender Geschwindigkeit an sich ziehen. Das ausgebreitete Blatt schwankte langsam und ziemlich gleichmäßig abwärts. Also muß gerade hierbei eine Kraft vorhanden sein, die der Erdanziehung entgegenwirkt und zum mindesten die erwartete Beschleunigung wettmacht. Es stimmt: Die Kraft der Reibung zwischen Blatt und Luft wirkt der Erdanziehung entgegen; wir werden sie später noch genauer betrachten, weil sie in unserem Leben eine große Rolle spielt.

Bei dem ausgebreiteten Blatt war die Reibungskraft entsprechend groß; denn eine große, gerade Fläche kam mit der Luft in Berührung, und das Blatt rutschte gewissermaßen mit List durch die Luft, einmal mit der einen, dann wieder mit der andern Kante in die Luft schräg hineinschneidend. In der Natur kommt es sogar vor, daß Dinge, die nach dem Fallgesetz herabfallen müßten, durch die Reibungskraft in der Luft gewissermaßen „hängenbleiben“, weil durch die starke (entgegengerichtete) Reibungskraft das Gewicht keine merkliche Wirkung hinterläßt. Ein Beispiel dafür ist die Wolke, am Himmel schwebend oder über der Erde als Nebel liegend. Die einzelnen Wassertröpfchen, aus denen die Wolke ja immer besteht, sind so leicht, daß ihr Gewicht die Luftreibung nicht überwinden kann. Sie fallen erst als Regen herab, wenn sie größer geworden sind. Die Schneeflocken fallen mit gleichbleibender Geschwindigkeit; hier hebt die Reibung gerade die Beschleunigung auf. Bei unserem zweiten Versuch fiel die Papier- oder Stanniolkugel schnell und beschleunigt. Eine Kugel — und erst recht ein Tropfen — schlüpft leicht zwischen den Luftteilchen hindurch; die Reibungskraft bleibt kleiner als das Gewicht. Eines ist dabei jedoch stets zu beachten (was schon Aristoteles gewußt hat): Etwas Reibung ist auch beim stromlinienförmigen Körper stets vorhanden, und sie wächst mit der Geschwindigkeit des sich bewegenden Körpers! Infolgedessen wird die Geschwindigkeit des fallenden Körpers niemals unendlich groß; früher oder später kommt der Augenblick, in dem die Geschwindigkeitszunahme aufhört (gleich Null wird) und der Körper mit seiner Endgeschwindigkeit gleichmäßig weitersaust. Das ist gewiß kein Trost für jemanden, der aus einer großen Höhe herabfällt; die Bremswirkung der Luftreibung läßt für ihn eine so große Endgeschwindigkeit zu, daß das Unheil nicht zu verhindern ist.

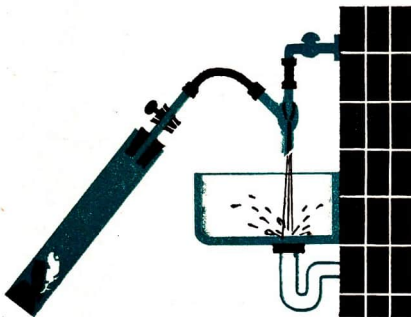
Wir wissen nun: Alle Körper fallen nach dem Gesetz der Massenanziehung. Bei jeder Bewegung in einem anderen Stoff (dem sogenannten Medium, bei unseren Versuchen in der Luft) entsteht eine Reibung, die der bewegenden Kraft entgegenwirkt. Wann der Körper seine Höchstgeschwindigkeit erreicht, hängt von seinem Gewicht ab, von seiner Form und Größe, von der Art des Stoffes, in dem sich der Körper bewegt. Es leuchtet ein, daß er in Wasser eine größere Reibung als in der Luft hervorruft.

Wir fragen uns nun, wie ein Körper im luftleeren Raum fällt? Hemmungslos wird er angezogen! Das macht den Weltraumfahrern Sorge, wenn sie auf einem Planeten ohne Lufthülle landen wollen; sie müssen ihren Fall mit eigener Kraft (Bremsraketen) bremsen.

Freier Fall im luftverdünnten Raum

Dieser Versuch ist etwas anspruchsvoller. Wir brauchen dazu eine einfache Wasserstrahl-Luftpumpe (an jeden Wasserhahn anzuschließen, auch für andere Versuche gut zu verwenden), ein kräftiges Glasrohr, etwa 75 cm lang und mit etwa 4 cm lichter Weite; dazu zwei passende Gummistopfen zum festen Verschließen beider Rohrenden. Der eine Stopfen wird durchbohrt (am einfachsten gleich in der Drogerie, in der die Sachen gekauft werden) und mit einer kurzen Glasröhre mit Hahn versehen.

So wird die Luft aus dem Glasrohr gepumpt



Wir schließen die Röhre an einem Ende und legen eine Daunenfeder oder ein Stückchen Papier und ein Geldstück oder eine Holz- oder Metallkugel hinein. Dann wird das andere Ende ebenfalls fest verschlossen. Die an den Wasserhahn angeschlossene Wasserstrahl-Luftpumpe wird durch einen kurzen Gummischlauch mit der Glasröhre verbunden. Bei offenem Luft-hahn lassen wir das Wasser möglichst stark einige Zeit laufen; meist sind einige Minuten nötig, bis das strömende Wasser genügend Luft aus der

großen Röhre herausgerissen hat. Dann drehen wir beide Hähne (erst Luft, dann Wasser) zu und schwenken das Rohr schnell in die Senkrechte, so daß Metall (oder Holz) und Daunenfeder nach oben geschleudert werden. Beides fällt natürlich danach sofort im Rohr herab – jedoch fällt die Feder so schnell wie das Metall. Wenn noch wesentliche Unterschiede zu sehen sind, müssen wir die Luft weiter herauspumpen. Anschließend läßt man die Luft langsam wieder in das Rohr hinein und die Teilchen noch einmal fallen; jetzt sieht man deutlicher als je den Einfluß der Luftreibung.

Zwischendurch etwas zum Nachdenken, zunächst über die gleichförmige Bewegung

Unsere Begriffsbestimmung, daß die Geschwindigkeit gleich dem Quotienten aus Weg und Zeit ist, zeigt deutlich, daß es beim Betrachten der Bewegung in der Physik stets auf den Zusammenhang zwischen Weg und Zeit ankommt:

$$v \text{ (Geschwindigkeit)} = \frac{s \text{ (Weg in Metern)}}{t \text{ (Zeit in Sekunden)}}$$

Die – bei physikalischen Größen stets *kursiv* gedruckten – Symbole sind Abkürzungen der lateinischen Wörter *velocitas*, *spatium* und *tempus*. (Das nicht kursive *s* bezeichnet die Zeiteinheit Sekunde.)

Das *Weg-Zeit-Gesetz* $v = \frac{s}{t}$ gilt für die gleichförmige Bewegung. Das Wort ist leicht zu verstehen, denn hier ist die Geschwindigkeit in jedem Zeitpunkt der Bewegung gleich.

Aus zwei gegebenen Größen der Gleichung läßt sich stets die dritte errechnen; notfalls stellt man vorher um, beispielsweise ist $s = v \cdot t$. Hiernach ist der Weg bei einer gleichförmigen Bewegung gleich dem Produkt aus der Geschwindigkeit und der Zeit. In der Praxis: Fahre ich mit einem Wagen 3 Stunden lang gleichmäßig mit 90 km je Stunde (so heißt es richtig, „Stundenkilometer“ ist falsch!), dann habe ich schließlich $90 \text{ km} \cdot 3 = 270 \text{ km}$ zurückgelegt. Aufmerksame Leser werden Einspruch erheben. „Niemand kann auch nur 30 Minuten lang mit unveränderter Geschwindigkeit fahren; es gibt immer wieder Hindernisse, die dazu zwingen, zeitweise langsamer zu fahren!“ Sie haben recht. Aber der Naturwissenschaftler weiß stets einen Ausweg; im Notfall schafft er einen neuen, passenden Begriff, die *mittlere Geschwindigkeit*.

Man mißt mehrmals in bestimmten Abständen die Augenblicksgeschwindigkeit, zählt die gemessenen Werte zusammen und teilt das Ergebnis durch die Anzahl der Messungen. Dann hat man den Durchschnittswert für die gesamte Zeit. Je mehr Werte man in kürzeren Abständen aufnimmt, um so genauer ist der Durchschnittswert. Dieses Verfahren spielt auch bei unseren

physikalischen Messungen eine Rolle. Zu unserem Wagenbeispiel: Wir lesen alle halben Stunden (also sechsmal) die Geschwindigkeit ab und erhalten

$v_1 = 90 \text{ km/h}$, $v_2 = 84 \text{ km/h}$, $v_3 = 96 \text{ km/h}$, $v_4 = 99 \text{ km/h}$, $v_5 = 94 \text{ km/h}$,
 $v_6 = 77 \text{ km/h}$; dann ist

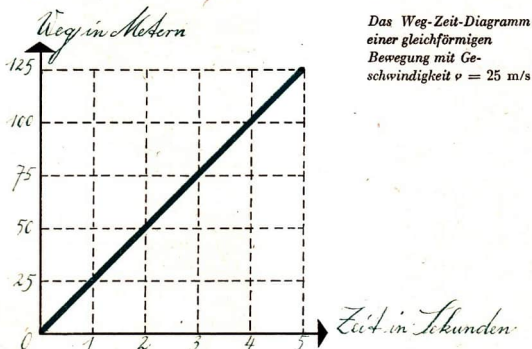
$$v_D = \frac{(90 + 84 + 96 + 99 + 94 + 77) \text{ km}}{6 \text{ h}} = \frac{540 \text{ km}}{6 \text{ h}} = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$



Der zurückgelegte Weg ist genauso lang, als wären wir die Strecke mit genau 90 km/h gefahren. Man kann das Weg-Zeit-Gesetz verblüffend einfach aufzeichnen; Kenner sehen dann mit einem Blick, was los ist.

Dazu ist ein Koordinatensystem nötig. Das klingt schwierig, ist es aber nicht; im Gegenteil: Wir untersuchen ja immer den Zusammenhang von zwei physikalischen Größen. Wir tragen die eine auf einer waagerechten Geraden, der Abszissenachse, und die andere auf einer dazu senkrechten Geraden ab, die man Ordinatenachse nennt; natürlich müssen wir vorher die passenden Maßstäbe einsetzen. (Abszisse kommt vom lateinischen abscondere – abschneiden, Ordinate vom lateinischen ordinare – zuordnen.)

Ein Beispiel: Die Waagerechte soll die Zeit in Sekunden aufnehmen, die Senkrechte den Weg in Metern. Die zu jeder Messung gehörenden Werte der beiden Größen tragen wir auf, das heißt hier die Sekundenzahl auf der Waagerechten, die Meterzahl auf der Senkrechten. Jetzt gehen wir von dem Punkt auf der Waagerechten senkrecht nach oben und von dem Punkt auf der Senkrechten waagerecht nach rechts; wo beide Geraden einander schneiden, da liegt der Zusammenhang zwischen den Meßpunkten. Solch ein einziger Schnittpunkt sagt uns freilich noch nichts. Wir müssen noch mehr Werte eintragen und die Schnittpunkte miteinander verbinden, dann zeigt sich etwas Großartiges: der Zusammenhang zwischen zwei sich



ändernden physikalischen Größen; ein physikalisches Gesetz liegt plötzlich als Kurve, als Diagramm, vor uns! Diagramm kommt aus dem Griechischen und bedeutet „das Hindurchgezeichnete“.

Wir nehmen wieder unser Beispiel: Ein Wagen fährt gleichmäßig 25 Meter je Sekunde. Wir nehmen Koordinatenpapier (Millimeterpapier) und zeichnen die Zeit 0 bis 5 Sekunden auf der Waagerechten, den Weg 0 bis 125 Meter auf der Senkrechten ein. Die Verbindungslinie unserer Schnittpunkte ergibt eine Gerade; der Geübte erkennt zweierlei: Die Gerade beweist, daß eine gleichförmige Bewegung dargestellt worden ist; je steiler aber die Gerade liegt, um so größer ist die Geschwindigkeit. — Wer hat übrigens gemerkt, daß es sich bei diesem Wagen um unseren handelt, mit dem wir mit 90 Sachen, nein: km/h auf der Autobahn gefahren sind? Das sind 25 m/s; und einige Sekunden haben wir die 90 km/h schon eingehalten.

Einiges über die Beschleunigung

Wer hier zweifelte, hat recht: Wo kommt diese schöne, gleichförmige Bewegung im Leben schon allein vor? Zumindest muß sie erst einmal den Wert Null haben, und dann hört sie sicherlich auch einmal wieder auf, geht also auf Null zurück. Unsere Schüssel, der Anlaß aller Überlegungen, fiel doch auch nicht mit gleicher Geschwindigkeit!

Nein, das tat sie nicht. Als sie sich, von der Masse der Erde liebevoll angezogen, aus der nassen Hand der Hausfrau löste, hatte sie zunächst — am Anfang der ersten Sekunde — die Geschwindigkeit $v_0 = 0$ m/s; am Ende der ersten Sekunde hätte sie $v_1 = 10$ (genau 9,8) m/s gehabt. Wir rechnen

schnell: mittlere Geschwindigkeit also $\frac{0 + 10 \text{ m/s}}{2} = 5$ m/s; in der ersten

Sekunde wäre die Schüssel also 5 m gefallen — wenn nicht der harte Fußboden den Fall so plötzlich unterbrochen hätte, daß die Scherben umherflogen. Das hat schon Galilei herausgefunden: Der fallende Körper durchläuft in jeder Sekunde eine größere Strecke, und zwar nach einem ganz bestimmten Gesetz. Die Ursache ist eine dauernd auf den Körper wirkende Kraft, die seine Bewegung entweder vergrößert oder (wenn sie entgegengesetzt ist) verringert. Die Folge dieser Kraft nennen wir *Beschleunigung*. Eine Verzögerung ist eine negative Beschleunigung — die gleiche Erscheinung, nur mit anderem Vorzeichen.

Werfen wir eine Kugel hoch in die Luft, so wird ihre große Anfangsgeschwindigkeit durch die Schwerkraft der Erde immer geringer, bis die Kugel in einer bestimmten Höhe einen winzigen Augenblick stillsteht; hier hat die Erdanziehungskraft gerade die von uns mitgegebene Schwungkraft aufgezehrt. Die Kugel beginnt nun zu fallen, und sie fällt in der gleichen Weise schneller, wie sie vorher langsamer stieg. Die Luftreibung lassen wir der Einfachheit halber aus der Überlegung heraus; wir machen dieses Gedankenexperiment im leeren Raum.

Die Beschleunigung b ist der Geschwindigkeitszuwachs je Sekunde. Als Gleichung sieht das etwas merkwürdig aus (v ist hier die Endgeschwindigkeit; siehe auch die Zahlentafel auf S. 23):

$$b = \frac{v}{t}; \quad v = \frac{2s}{t}; \quad b = \frac{2s}{t^2}; \quad b = \frac{2s}{t^2}.$$

Wohlgemerkt: Diese Gleichungen gelten für den freien Fall!

„Die Zeit im Quadrat“ steht im Nenner. Vorstellen können wir uns das praktisch nicht. Trotzdem ist das keine Sache des Glaubens, sondern eine einwandfreie, wissenschaftlich begründete Ableitung. Die Tatsachen, von denen wir ausgehen, sind bewiesen, und die Regeln, nach denen wir ableiten, sind es ebenso. Was wir hier brauchen, sind die Einsicht in den notwendigen Zusammenhang zwischen Physik und Mathematik, ein gewisses Denkvermögen und die Fähigkeit, auch einmal mit unvorstellbaren, „abstrakten“ Größen zu rechnen. Das Experiment wird uns das rechnerisch gefundene Ergebnis bestätigen.

Galilei, wie gesagt, fand das Gesetz des Falls, und viele andere Forscher nach ihm haben es bestätigt: Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Wir wollen sie später noch genauer untersuchen. Vorher wollen wir noch eines bedenken, was schon angedeutet wurde: Alle Körper, die durch ein „widerstehendes Medium“ fallen, beginnen das mit der Geschwindigkeit Null (v_0); sie fallen dann wirklich und mit wachsender Geschwindigkeit, bis sie über kurz oder lang eine bestimmte Geschwindigkeit erreichen und beibehalten. Wir wollen das selber darstellen, müssen uns aber dazu noch über zwei verschiedene Begriffe klarwerden: *Masse* und *Gewicht*.

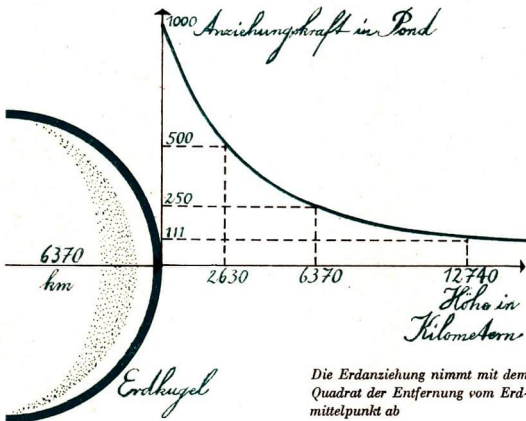
Jeder Körper hat eine Masse. Sie ist für den Physiker nicht dasselbe wie die Stoffmenge, sondern ein feststehender Begriff mit den Maßeinheiten kg und g. Der Physiker nennt sie träge (das ist hier kein Tadel!), weil sie von sich aus immer in dem (ruhenden oder gleichförmig-geradlinig bewegten) Zustand bleiben will, in dem sie gerade ist. Das Musterstück (Urkilogramm) einer solchen Masse von 1 kg wird in Paris aufbewahrt – unter sicherem Verschuß, denn es ist nicht nur für die Forschung wichtig, sondern auch kostbar: Es besteht aus einem Platin-Iridium-Zylinder von 39 mm Höhe und 39 mm Durchmesser.

Jeder Körper hat eine bestimmte Masse, und die ändert sich nicht – ob wir damit am Äquator schwitzen, am Nordpol frieren oder schwerelos durch den Weltraum fliegen. (Für Weltraumfahrer wäre es ja auch höchst unerfreulich, wenn sich ihre Körper ebenso wie die Raumschiffkörper mit allem Drum und Dran allmählich in nichts auflösten, wenn sie immer weiter aus dem Schwerfeld der Erde herausfliegen!) Nein – Masse bleibt Masse, und Kilogramm bleibt Kilogramm, zumindest bei den Geschwindigkeiten, mit denen wir es hier zu tun haben.

Wir wägen (nicht wiegen!) die Masse eines Körpers stets auf einer Balkenwaage (Hebelwaage), beispielsweise einer Tafelwaage, Neigungswaage, Dezimalwaage oder auf einer Analysenwaage des Chemikers; dabei verglei-

chen wir den Körper mit geeichten Massestücken bestimmter Größen. Wieder ist es gleich, wo wir sind – wenn nur überhaupt noch irgendein Schwerefeld vorhanden ist; wir können unsere Massen genausogut auf dem Mond wie auf der Erde vergleichen.

Beide, das geeichte Vergleichsstück und unsere zu messende Masse, werden in gleichem Maße angezogen; sie haben das gleiche Gewicht (Gleichgewicht). Damit sind wir unversehens beim Gewicht angelangt. Freilich: Eine Masse hat auch ein Gewicht; das bleibt jedoch nicht überall gleich, sondern es ist von dem jeweiligen Schwerefeld abhängig. Selbst auf der Erde wiegt 1 kg Masse an den Polen etwas mehr als am Äquator! Das liegt daran, daß die Entfernung der Erdoberfläche vom Erdmittelpunkt an den Polen etwas



kleiner als am Äquator ist; dort hat sich die Erde infolge ihrer schnellen Eigendrehung (Fliehkraft!) ein wenig „ausgebogen“. Die Erdbeschleunigung aber nimmt mit dem Quadrat der Entfernung vom Erdmittelpunkt ab. Für 1 kg Masse sieht das so aus, wie die obenstehende Abbildung zeigt. Masse und Gewicht sind also zwei ganz verschiedene Begriffe, die jedoch durch die Stärke des Schwerefeldes miteinander zusammenhängen: Das Gewicht (G) ist eine Kraft (Gewichtskraft); es ist gleich der Masse (m) mal der Beschleunigung (g), die ihr von der Erdbeschleunigung erteilt wird:

$$G = m \cdot g.$$

Das Gewicht hat auch eine besondere Maßeinheit: das Kilopond (kp) und das Pond (p); es wird, da es mit der Erdbeschleunigung zusammenhängt, stets

mit der Federwaage gemessen. (Das Gewicht zieht eine Wendelfeder auseinander.)

Wir wollen auf der Erde bleiben: Die größten Unterschiede, auf Normalhöhe der Oberfläche bezogen, liegen – wie gesagt – zwischen Pol und Äquator. Das sind 90 Breitengrade, wie jeder leicht auf dem Globus feststellen kann. Wenn wir den Mittelwert nehmen, erhalten wir 45 Grade; hier ist das Gewicht in kp gerade ebenso groß wie die Masse in kg. Der Unterschied ist auch in unseren Breitengraden nur gering; er macht sich erst in der dritten Stelle hinter dem Komma bemerkbar.

Nun wollen wir im Experiment untersuchen, wie der freie Fall verschieden großer Massen in der (widerstehenden) Luft vor sich geht. Wenn wir einigermaßen geschickt sind, können wir sogar quantitativ, das heißt messend, experimentieren.

Die kleinen Fallkegel

Wir bauen aus Seidenpapier, im Notfall aus dünnem Durchschlagpapier, einige ziemlich flache Kegel. Dazu schneiden wir aus dem Papier eine Kreisfläche mit etwa 6 cm Durchmesser, schneiden einen Quadranten (ein Viertel der Kreisfläche mit dem Zentriwinkel 90°) heraus und kleben die so entstandenen Radienkanten mit ein wenig Leim zusammen; der Kegel ist fertig. Er fällt mit der Spitze sehr bald nach dem Loslassen ruhig und gleichförmig schnell nach unten.

Die Masse eines Kegels bezeichnen wir mit a Gramm; sie beträgt vermutlich zwischen 0,1 und 0,2 g. Ferner sind Massestücke nötig von a , $2a$, $3a$ und $4a$ g. Wir stellen sie am einfachsten dadurch her, daß wir die Mantelfläche des Kegels noch mehrmals aus dem gleichen Papier schneiden (übereinanderlegen!) und dann Kügelchen aus einem, aus zwei, drei und vier dieser Papierstücke formen.

Noch einfacher geht es mit ein wenig Mathematik: Die Fläche unseres Kegelmantels mit dem Kreisradius $r = 3$ cm ist

$$\frac{3 \cdot 3,14 \cdot 9 \text{ cm}^2}{4} = \frac{3 \cdot \pi \cdot r^2}{4} = 21,2 \text{ cm}^2.$$

Ziehen wir daraus die Quadratwurzel, so erhalten wir 4,6 cm. Jetzt brauchen wir nur noch Quadrate mit der Seitenlänge 4,6 cm auszuscheiden, um ein Papierstück zu erhalten, das in Masse und Gewicht unserem Dreiviertelkreis gleich ist.

Wenn man die kleinen Papierkegel aus größerer Höhe fallen lassen will, ohne auf eine Leiter oder einen Turmbau aus Tisch und Stühlen steigen zu müssen, dann benutzt man einen Drahting (4 bis 5 cm Durchmesser), der an einer entsprechend langen Stange befestigt ist – beispielsweise am Stiel eines Besens oder eines Obstpflückers. Wir können die Versuche im Zimmer, besser noch in einer hohen Halle oder im Treppenhaus durchführen. Zum Messen der Zeit nehmen wir eine Stoppuhr oder ein Metronom; wir können auch die Sekunden laut zählen: „eins – und – zwan – zig“ usw. und



damit die Sekunden und noch die Viertelsekunden mit ausreichender Genauigkeit messen. Das letztgenannte Verfahren müssen wir freilich erst mit Hilfe einer Uhr (Sekundenzeiger!) üben. Den Fallweg kennzeichnet man mit Kreide oder Papierstückchen an der Wand, oder man hängt einen unten beschwerten Bindfaden auf, an dem man Papierstückchen auf- und ab-schiebbar anbringt.

Zunächst lassen wir einen Kegel fallen. Er fällt eine kurze Zeit in beschleunigter, danach in gleichförmiger Bewegung; er hat also seine Endgeschwindigkeit bald erreicht.

Wir messen die gleichförmige Geschwindigkeit v des Kegels. Das erste Stück des Fallweges, etwa 20 cm, bleibt unberücksichtigt; hier ist die Bewegung noch beschleunigt. Bei einer Zimmerhöhe von beispielsweise 320 cm läßt man den Kegel von der Decke aus fallen; von der Marke 20 cm an messen wir die Fallzeit über alle drei Meter und wenn möglich auch über jedes einzelne Meter (um zu prüfen, ob die Geschwindigkeit überall gleich ist). Der Kegel braucht d Sekunden, um die 3 m zu durchlaufen. Dann ist die Geschwin-

$$\text{digkeit } v = \frac{s}{t} = \frac{3 \text{ Meter}}{d \text{ Sekunden}}.$$

Beim Durchlaufen eines Meters muß die Zeit etwa $\frac{d}{3}$ Sekunden sein.

Unsere Messungen sind infolge der einfachen Versuchsbedingungen nicht genau; es ist daher stets zu empfehlen, mehrere (mindestens fünf) gleiche Versuche zu machen und daraus den Mittelwert zu errechnen. Wie bei der mittleren Geschwindigkeit: alle Werte zusammenzählen und die Summe durch die Anzahl der Versuche teilen.

Die Geschwindigkeit des Fallkegels haben wir nun, und wir wissen auch, daß sie gleichförmig ist, weil die Gegenkraft der Luftreibung gerade die durch die Erdanziehung vorhandene Beschleunigung aufhebt. Jetzt wird es etwa schwieriger, aber um so reizvoller:

Die Fallkegel nehmen „Fracht“ auf

Dieser Versuch verläuft wie der vorhergehende – mit dem Unterschied, daß wir der Reihe nach unsere Papier-Massestückchen vorher in den Kegel legen – zuerst das 1a-Stück, beim nächsten Versuch das 2a-Stück usw. Wer will, kann die Reihe dadurch fortsetzen, daß er die Stücke a und 4a oder 2a und 3a hineinlegt und so 5a Belastung erhält und so fort (bei zuviel Last kippt der Kegel). Der Kegel fällt jedesmal etwas schneller; die Zeit läßt sich aber über mehrere Meter noch gut messen.

Das Ergebnis verblüfft: Die gleichbleibenden Endgeschwindigkeiten verhalten sich wie $\sqrt{1} : \sqrt{2} : \sqrt{3} : \sqrt{4} : \sqrt{5}$ usw. Dabei gilt der leere Kegel als Masse 1a; seine Werte liegen aus dem vorhergehenden Versuch vor. Die Geschwindigkeit des Fallkegels wird verdoppelt, wenn die vierfache (2^2) Masse und damit das vierfache Gewicht vorhanden ist. Verdreifacht wird die Geschwindigkeit bei neunfachem Gewicht und so weiter. Beim ersten Versuch entsprach der Masse 1a die Geschwindigkeit $\sqrt{1} = 1$, beim vierten Versuch der Masse 4a die Geschwindigkeit $\sqrt{4} = 2$ – die doppelte also erst.

Der Kegel wird daher entsprechend stark gebremst, und wir kommen zu der Folgerung: *Der Widerstand der Luft wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit des bewegten Körpers.*

Bei der doppelten Geschwindigkeit bremst die Luftreibung das vierfache (2^2), bei dreifacher Geschwindigkeit das neunfache (3^2), bei vierfacher Geschwindigkeit das sechzehnfache (4^2) Gewicht – und so weiter.

Als Hilfe für den Versuch sind in der folgenden Zahlentafel die Werte angegeben, die sich bei einer Fallhöhe von 2 m ergeben haben ($s = 2$ m):

Masse (m) in g	Zeit (t) in Sekunden	$v = \frac{s}{t} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}}$	\sqrt{n} n = 1 bis 5
a	2,8	0,71	1,0
a + a = 2a	2,0	1,0	1,41
a + 2a = 3a	1,6	1,25	1,73
a + 3a = 4a	1,4	1,43	2,0
a + 4a = 5a	1,25	1,6	2,24

Wir können jetzt leicht die Verhältnisgleichungen aufstellen und prüfen, ob sie (einigermaßen, nicht genau!) stimmen:

$$0,71 : 1,0 = 1,0 : 1,41;$$

$$1,0 : 1,41 = 1,25 : 1,73;$$

$$1,25 : 1,73 = 1,6 : 2,24$$

usw.

Der Fall im flüssigen Medium

Flüssigkeiten hemmen die Bewegung eines Körpers noch stärker, als die Luft das vermag; der Grund liegt in der größeren Dichte der Flüssigkeiten. Die Bewegung verläuft daher langsamer, und wir können sie besser beobachten und messen.

Der langsame und der schnelle Taucher

Wir brauchen ein möglichst hohes Standglas von einigen Zentimetern lichter Weite; wir können auch das Fallrohr vom Versuch auf Seite 15 verwenden, oben offen, unten verschlossen und gut befestigt. Den Taucher bauen wir uns so: Mit einem angewärmten alten Messer schneiden wir von einer gewöhnlichen Haushaltskerze (22 mm Durchmesser) unten ein Stück von 15 bis 30 mm Länge ab. Mitten durch das Kerzenstück bohren wir einen angewärmten Draht (gegebenenfalls den Docht herausziehen!). Das eine Drahtende biegen wir zu einer kleinen Öse um, das andere lassen wir lang an der anderen Seite des Kerzenstücks herausragen. Kupferdraht von 1,5 mm Durchmesser soll beispielsweise zunächst etwa 5 cm lang sein bei einer Länge des Kerzenstücks von 16 mm.

Jetzt füllen wir das Standgefäß mit Wasser und setzen (mit Drahthaken oder Pinzette) den Taucher hinein. Er geht, wenn wir den Draht nicht zu schwach oder zu kurz gewählt haben, zunächst einmal unter. Wir müssen ihn heraufholen, ein Stückchen Draht abschneiden und den Versuch wiederholen – so oft, bis der Taucher gerade noch im Wasser schwebt. Man kann auch für den feinen Ausgleich ein Stückchen vom Kerzenstück abschneiden. Beim Prüfen, ob er sinkt, müssen wir den Taucher vorsichtig ein wenig unter die Wasseroberfläche stoßen; andernfalls stören uns die erstaunlichen Wirkungen der Oberflächenspannung, die wir später noch experimentell untersuchen werden.

Schwebt unser Taucher also gerade im Wasser, dann biegen wir auch das zweite Drahtende zu einer Öse. Das Standglas versehen wir außen von oben bis unten mit einem schmalen Papierstreifen mit Maßstab, etwa Streifen aus Millimeterpapier (Koordinatenpapier). Zum Ankleben eignet sich jeder als Alleskleber bekannte Kunstleimstoff. Aus einer kleinen Büro-Heftmaschine holen wir uns neun Heftklammern und biegen sie ringförmig um. Diese Klammern sind meist 24 mm lang und haben einen rechteckigen Querschnitt (0,5 mm mal 1,0 mm). Selbstverständlich können wir auch entsprechende Stücke von einem dünnen Draht abschneiden; sie müssen nur alle genau gleich lang sein.

Jetzt beginnt der eigentliche Versuch: Wir hängen einen Ring an den Taucher und setzen ihn in das Wasser. Er sinkt langsam unter, und wir messen seine Geschwindigkeit in m/s – zur Sicherheit mehrmals, um einen guten Mittelwert zu erhalten. Der Taucher mit dem einen Ring entspricht dem Papierkegel im vorhergehenden Versuch. Die Zeit messen wir in der bekannten Weise.

Aufmerksame Leser wissen schon, was nun folgt: Wir hängen zu den weiteren Messungen 2, 3, 4 und schließlich 9 Ringe an den Taucher und messen immer wieder die Geschwindigkeit. Wieder ergibt sich das Gesetz des mit der Körpergeschwindigkeit quadratisch wachsenden Widerstandes im Medium. Bei vier Ringen ist die Geschwindigkeit erst zweimal so groß, bei neun dreimal so groß wie bei einem einzigen Ring.

Wir messen die gleichbleibende Geschwindigkeit

Dies ist (zur Belohnung) ein ganz einfacher Versuch, auch zum Üben geeignet. Wir füllen unser Glasgefäß vom vorhergehenden Versuch mit gewöhnlichem (leichtflüssigem, hellem) Maschinenöl. Mit Hilfe einer Tropfpipette, beispielsweise aus einem Medizinfläschchen, das Augen- oder Nasentropfen enthalten hat, lassen wir vorsichtig einen Tropfen Wasser aus kurzer Entfernung auf das Öl fallen. Der Tropfen sinkt langsam mit gleichförmiger Geschwindigkeit, die wir gut messen können, durch das Öl. Auch das Sinken von Kugeln aus kleinen Kugellagern im Öl läßt sich gut beobachten.

Bringt man mit Fuchsin gefärbtes Anilin ($C_6H_5NH_2$) tropfenweise in Wasser, kann man mehrere Einzeltropfen zu einem einzigen, großen Tropfen (bis 3 cm Durchmesser) vereinigen. Wir stellen auf diese Weise verschieden

große Tropfen her und beobachten, wie sie sinken. Bei dieser Gelegenheit haben wir das Prinzip eines wichtigen technischen Meßverfahrens kennengelernt: die „Kugelfallmethode“ zum Bestimmen der Zähigkeit von Flüssigkeiten. Je zäher die Flüssigkeit, um so langsamer sinkt darin der Körper nach unten.

Wer Paraffinöl im Hause hat, mag das Standglas damit füllen und eine gelbe, glatte Erbse hineinfallen lassen. Sie sinkt mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von etwa 2 cm/s.

Freier Fall – jetzt mit Zahlen und Versuchen

Wer die vorhergehenden Abschnitte mit Verständnis gelesen hat, für den bietet dieses Kapitel keine Schwierigkeiten mehr. Wir wollen den freien Fall einmal allein, ohne Reibungswiderstände in der Luft, in Gedanken betrachten und dazu Versuche durchführen, bei denen wir den Luftwiderstand möglichst gering halten.

Der freie Fall ist eine beschleunigte Bewegung, das wissen wir. Die Beschleunigung wird durch die Erdanziehung (Schwere) hervorgerufen; man nennt die Fallbeschleunigung deshalb auch Schwerebeschleunigung oder Erdbeschleunigung. Von dem lateinischen Wort *grávitás* für Schwere ist das allgemein gebräuchliche Kurzzeichen g für die Fallbeschleunigung abgeleitet.

Wenn eine Stahlkugel 4 Sekunden lang frei fällt, legt sie in den einzelnen Sekunden (das ist gemessen worden) folgende Strecken zurück:

1	2	3	4	5	6
Zeit t in s	Gesamtweg (Fallhöhe) s der Kugel in m	Mittlere Geschwindigkeit in m/s also	Anfangs- geschwindigkeit in m/s	End- geschwindigkeit v in m/s	Beschleunigung in m/s
1.	5	5	0	10	10
2.	20	15	10	20	10
3.	45	25	20	30	10
4.	80	35	30	40	10

Versuchswerte zum freien Fall

Jeder kann diese Zahlen – etwa in einem Treppenhaus – mit der Stoppuhr nachprüfen, und zwar mit einer Stahlkugel, einem Papierkügelchen, einer Holzkugel und anderen kleinen Gegenständen, bei denen sich die Luftreibung nicht wesentlich auswirkt. Er wird die Zahlen bestätigt finden, ganz gleich, welche Masse der fallende Gegenstand hat. Wir werden die Zahlen sehr bald in einfacherer Art praktisch prüfen.

Bei der obenstehenden Zahlentafel fallen uns folgende Tatsachen auf: Verständlich ist zunächst, daß die Anfangsgeschwindigkeit der Kugel in jeder Sekunde gleich der Endgeschwindigkeit in der vorhergehenden Sekunde ist – in der ersten Sekunde entsprechend gleich Null, denn vorher bewegte

sich die Kugel ja überhaupt nicht. Da die Kugel in der ersten Sekunde 5 m zurückgelegt hat, muß sie eine mittlere Geschwindigkeit von 5 m/s gehabt haben. Sie ist zweifellos gleichmäßig beschleunigt worden, denn die Erdanziehung ändert sich nicht; also muß die Endgeschwindigkeit 10 m/s sein:

$$\frac{0 + 10 \text{ m/s}}{2} = 5 \text{ m/s.}$$

Die Anfangsgeschwindigkeit war Null; infolgedessen ist die Endgeschwindigkeit ganz und gar auf die Erdbeschleunigung zurückzuführen. Und diese ist tatsächlich 10 m/s²! Ganz genaue Messungen ergeben 9,80665 m/s² für 45° geographische Breite und für Meereshöhe; dieser Wert ist uns jedoch zu umständlich zum Rechnen.

Die Erdbeschleunigung $g = 10 \text{ m/s}^2$ taucht auch folgerichtig in jeder Sekunde wieder gleichbleibend auf; dadurch erhöht sich die Endgeschwindigkeit von der vorhergehenden Sekunde immer um den gleichen Betrag 10 m/s. Dadurch können wir die Endgeschwindigkeit der Kugel in jeder beliebigen Sekunde leicht errechnen (Spalte 5 der Zahlentafel):

$$v = g \cdot t.$$

Die Anfangsgeschwindigkeit liegt jeweils um 10 m/s (Spalte 4), die mittlere Geschwindigkeit um 5 m/s (Spalte 3) niedriger. Zum Berechnen der Weglänge gehen wir von der mittleren Geschwindigkeit der Kugel in jeder Sekunde aus und erhalten 5 m, 15 m, 25 m, 35 m und so fort. Die Weglängen verhalten sich also wie 1 : 3 : 5 : 7 ... und setzen sich in der Spalte 2 zur gesamten Weglänge nach 2 s, 3 s, 4 s usw. zusammen.

Auf diese Weise werden die Weglängen, die man im Versuch messen kann, verständlich. Eine nähere Betrachtung ergibt jedoch einen weiteren überraschenden Zusammenhang — wenn wir die Zahlen nämlich in Faktoren auflösen:

$$\begin{array}{rcl} 5 & = & 5 \cdot 1^2 \\ 20 & = & 5 \cdot 2^2 \\ 45 & = & 5 \cdot 3^2 \\ 80 & = & 5 \cdot 4^2 \\ \hline s & = & a \cdot t^2 \end{array} \quad a \text{ (konstant)} = \frac{s}{t^2}$$

Die Zahl der Sekunden, die Fallzeit, taucht beim Fallweg im Quadrat auf, oder (anders ausgedrückt): Der Gesamtweg wächst mit dem Quadrat der Fallzeit! Und die 5 vor den Quadratzahlen — ob sie mit der Beschleunigung zusammenhängt? Ja, sie ist die halbe Beschleunigung. Damit haben wir die Gleichung für den freien Fall:

$$\text{Gesamtweg (Fallhöhe)} s = \frac{g}{2} \cdot t^2.$$

Setzen wir für Beschleunigung, die ja nicht immer gleich g sein muß, allgemein b ein, so erhalten wir das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

$$s = \frac{b}{2} t^2.$$

Es gibt den Zusammenhang zwischen Weg (s) und Zeit (t) an. Das *Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung* ist allgemein

$$v = b \cdot t.$$

Es gibt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit (v) und Zeit (t) an. Angewendet wird der freie Fall in der Technik zum Beispiel bei der Ramme. Ihre Wirkung hängt von der Hubhöhe ab, das heißt vom gesamten Fallweg des „Bären“.

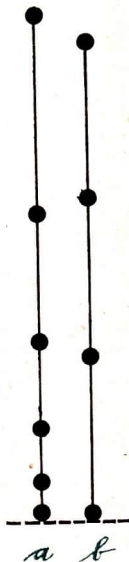
Und nun wollen wir uns überzeugen, daß die Zahlen der Tabelle auf Seite 25 richtig sind. Zunächst ein einfacher Versuch für Leser, die gut hören können.

Es klappt am Schnürchen

Wir nehmen einen dünnen, festen Faden und knüpfen an einem Ende eine durchbohrte Holzkugel, Kastanie, Schraubenmutter oder ähnliches fest. Weitere gleiche Körper verknoten wir in der Schnur in Abständen, die sich wie die Fallwege in den aufeinanderfolgenden Sekunden (1 : 3 : 5 : 7 usw.) verhalten, beispielsweise 20 cm + 60 cm + 100 cm + 140 cm. Diese Fallschnur ist 320 cm lang. Hat man zum Experimentieren einen höheren Raum zur Verfügung, so soll man ihn mit einer längeren Fallschnur ausnutzen, etwa mit 25 cm + 75 cm + 125 cm + 175 cm = 400 cm oder in einem Treppenhaus: 80 cm + 240 cm + 400 cm + 560 cm + 720 cm = 20 m.

Lassen wir die von oben nach unten frei hängende Schnur fallen, so hören wir, daß die Kugeln in ganz gleichmäßigen Zeitabständen auf den Boden schlagen; bei kurzer Fallschnur wirkt es wie das Knattern einer Maschinenspule. Die größeren Abstände werden durch die entsprechend größere Fallgeschwindigkeit wieder ausgeglichen; unsere Zahlen müssen stimmen.

Dann müßte doch eine Fallschnur mit gleichen Abständen zwischen den eingeknüpften Fallkörpern ungleichmäßige Aufschläge ergeben? Versuchen wir es, und wir werden hören, daß die Aufschläge immer schneller aufeinanderfolgen.



Fallschnüre mit gleichmäßigem (a) und ungleichmäßigem (b) Aufschlag

Der fallende Ziegelstein

Um den Wert der Erdbeschleunigung g unmittelbar zu bestimmen, braucht man nur einen halben Ziegelstein (oder ähnliches) und eine Stoppuhr – dazu freilich noch ein Haus mit mehreren Stockwerken. Wir lassen beispielsweise aus 15 m Höhe (auf den Ruf: „Zwei – eins – Null!“) den Stein fallen, messen die Fallzeit mehrmals und bilden den Mittelwert; er möge 1,72 s betragen.

Aus der Gleichung $s = \frac{g}{2} \cdot t^2$ rechnen wir g aus:

$$15 \text{ m} = \frac{g}{2} \cdot 1,72^2 \text{ s}^2; \quad \frac{g}{2} = \frac{15 \text{ m}}{2,96 \text{ s}^2} = 5,06 \text{ m/s}^2.$$

Wir haben demnach für g den Wert von 10,1 erhalten. Genauer dürfen wir den Wert nicht angeben, weil wir die 15 m Höhe sicherlich nicht auf den Zentimeter genau feststellen können.

Man hat in den letzten 100 Jahren eine ganze Reihe mehr oder weniger geistreicher Geräte ausgedacht und gebaut, um das Fallgesetz auch sichtbar darzustellen: Pendel und Fallmaschinen. Was da alles fällt! Brennende Glühlampen vor Filmen, tönende und zugleich schreibende Stimmgabeln, sich vor einem Tintenstrahl drehende Zylinder, Papierstreifen vor schreibenden Pendeln – und noch manches mehr; alles das ist für uns mit zuviel Aufwand verbunden und nach der einfachen Fallschnur auch nicht nötig. Außerdem gibt es noch ein sehr überzeugendes Verfahren, das auch für uns in Betracht kommt: der allgemeine Nachweis der Beschleunigung mit der geneigten Ebene. Auch Galilei hat, wie schon erwähnt, mit ihr experimentiert.

Wir beschleunigen auf der geneigten Ebene (Fallrinne)

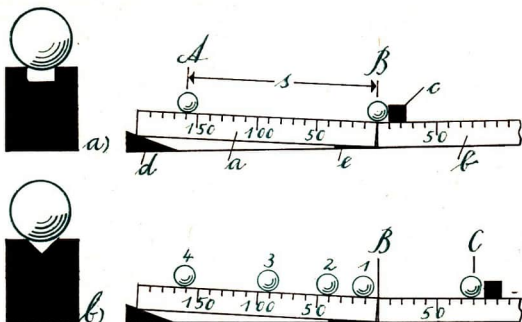
Wir bilden zunächst etwas Ähnliches wie eine geneigte Ebene, indem wir unsere „richtige“ Fallschnur (a) vom vorigen Versuch am Boden befestigen und straff gespannt schräg nach oben halten. Wenn wir sie fallenlassen, hören wir die Fallkörper wieder im gleichen Takt aufschlagen; nur ist diesmal die Zeitdauer zwischen zwei Aufschlägen kürzer.

Nun zur wirklichen geneigten Ebene! Sie ist irgendeine schräggestellte Bahn, auf der etwas fährt oder rollt: ein leichtes Wägelchen, eine glatte Walze aus Holz oder eine Metallkugel (Stahlkugel). Die „Ebene“ kann eine Fallrinne aus Hartholz oder Metall (für eine Kugel) oder ein gehobeltes Brett (für eine Walze) sein; man kann sie aus den Schienen einer Modelleisenbahn, aus Teilen des Metallbaukastens (Winkelbänder!), aus Metallstreifen und anderem bauen. Bewährt hat sich eine Hartholz-Vierkantleiste (etwa 4 cm mal 6 cm), in deren eine Schmalseite eine 15 mm breite, scharfkantige Rinne mit U- oder V-Profil eingefräst ist, wie das die Abbildung auf der folgenden Seite zeigt; auch eine Schiene für Schleudergardinen ist gut geeignet.

Wichtig ist zweierlei: Die Rinne ist uns einmal um so lieber, je länger sie ist. 180 bis 200 cm für die eigentliche Fallrinne und dazu 180 cm für die waagerechte Auslaufrinne (b) gestatten gute Messungen. Zum anderen muß die Reibung so klein wie möglich gehalten werden. (Eine Stahlkugel, die auf einer Metallschiene läuft, ist besonders günstig.)

Entlang der ganzen Länge wird eine Zentimeterskala angebracht, um die Weglänge messen zu können.

Die Zeit messen wir am besten mit einer Stoppuhr oder einem Metronom. Empfehlenswert ist noch ein Anschlagklötzchen (c). Die linke Seite heben wir am besten mit einem Holzkeil (d) an; dadurch können wir den Neigungswinkel sehr fein einstellen. Damit der Übergang von der geneigten zur waagerechten Ebene schlüssig ist, legen wir unter das rechte Ende der geneigten Ebene entsprechende Pappstücke (e).



Geneigte Ebenen im Profil und in der Seitenansicht

Wir lassen nun die Kugel bei verschiedenen Neigungen und von verschiedenen Punkten von A aus auf B rollen. Vom Punkt B aus messen wir genau eine Sekunde und lesen ab, wie weit die Kugel auf b gelaufen ist. Diese Strecke gibt uns, weil sie gerade auf 1 s bezogen ist, die Endgeschwindigkeit (Augenblicksgeschwindigkeit) der Kugel an. Je größer die Neigung und je länger der Kugelweg auf a, um so größer ist die Endgeschwindigkeit der Kugel.

Wir machen jetzt vier Messungen hintereinander: Die Endgeschwindigkeit der Kugel wird auf der Auslaufrinne B-C gemessen, und zwar nachdem die Kugel auf der Fallrinne 1 s, 2 s, 3 s und 4 s gelaufen ist. Also die Endgeschwindigkeiten nach 1, 2, 3 und 4 Sekunden! (Bei kürzeren Fallrinnen, etwa von 1 m Länge, nach 1, 2 und 3 Sekunden).

Dazu stellen wir die Rinne a zunächst so ein, daß die Kugel genau 4 s braucht, um von A nach B zu gelangen (Halteklötz in B!). Die Endgeschwindigkeit wird wieder von B an auf b gemessen; sie ist zahlenmäßig gleich dem Weg in einer Sekunde. Dabei gilt die Länge der Strecke immer von dem einen Auflagepunkt der Kugel zum anderen; man muß also stets die Unterseite der Kugel beobachten. Der Halteklötz muß entsprechend um die Länge des Kugelradius verschoben werden.

Damit die Kugel 1 s auf a läuft, muß A in 10 cm Entfernung von B liegen, für 2 s bei 40 cm, für 3 s bei 90 cm und für 4 s bei 160 cm. Die Versuche ergeben die Werte in der Tabelle auf Seite 30.

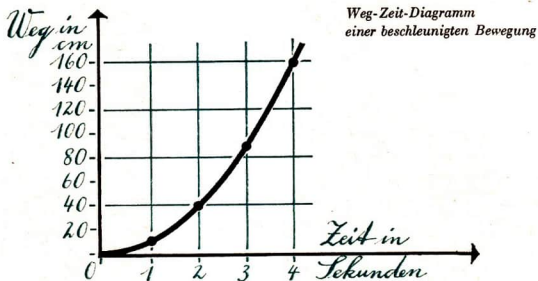
Die Endgeschwindigkeit wächst also verhältnismäßig zur Zeit mit der gleichbleibenden Beschleunigung b von 20 cm/s^2 ($v = b \cdot t$); die Bewegung ist *gleichmäßig beschleunigt* (Spalten 1 bis 3). Die Weglängen fanden wir ebenfalls durch den Versuch (Spalte 4). Wir finden unsere Behauptungen vom freien Fall bestätigt: Im Weg der Kugel stecken die halbe Beschleunigung und das Quadrat der Zeit als Faktoren! Freilich haben wir es bei

1	2	3	4	5
Laufzeit t der Kugel auf a in s	Endgeschwin- digkeit v in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	Beschleuni- gung $b = \frac{v}{t}$ $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	Weg der Kugel auf a in cm	Mittlere Ge- schwindigkeit der Kugel auf a in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$
1	20	$\frac{20}{1} = 20$	$10 = 10 \cdot 1^2$	10
2	40	$\frac{40}{2} = 20$	$40 = 10 \cdot 2^2$	20
3	60	$\frac{60}{3} = 20$	$90 = 10 \cdot 3^2$	30
4	80	$\frac{80}{4} = 20$	$160 = 10 \cdot 4^2$	40

Die Kugel läuft von vier verschiedenen Ausgangspunkten ab

unserem Versuch (erfreulicherweise) mit Zentimetern zu tun; beim freien Fall geht es um Meter. Ein Beweis für eine Möglichkeit des Experiments: die Änderung der Maßstäbe! Vergrößern wie die Neigung der Fallrinne, so wird das Ablesen immer schwieriger für uns; die Beschleunigung steigt. Steht die Fallrinne schließlich senkrecht, so haben wir den Grenzfall erreicht: den freien Fall.

Wir behalten die Neigung der Fallrinne a bei, lassen die Kugel bei A ablaufen und messen die einzelnen Wege, die sie in der 1., 2., 3. und 4. Sekunde durchläuft (bei kürzerer Ebene wieder nur bis zur 3. Sekunde); anders ausgedrückt: Wir messen den Weg s , den die Kugel nach 1, 2, 3 und 4 Sekunden zurückgelegt hat. Das ist etwas schwieriger, aber durchaus noch gut meßbar.



Das Ergebnis sieht etwa so aus (Spalte 1 und 2) :

Zeit t in s	Weg s in cm nach t Sekunden	Beschleunigung $b = \frac{s}{t^2}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$
1	$10 = 10 \cdot 1^2$	$\frac{10}{1} = 10$
2	$40 = 10 \cdot 2^2$	$\frac{40}{4} = 10$
3	$90 = 10 \cdot 3^2$	$\frac{90}{9} = 10$
4	$160 = 10 \cdot 4^2$	$\frac{160}{16} = 10$

Der Gesamtwert der Kugel wird untersucht

In der Spalte 2 mit der Weglänge finden wir wieder die Faktoren Beschleunigung (konstant) und die Quadrate der Zeiten; b ist hier etwa gleich einem Hundertstel der Erdbeschleunigung. Auch dieser Versuch beweist die Richtigkeit unseres Fallgesetzes.

Entsprechend dem Weg-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung können wir jetzt das Weg-Zeit-Diagramm der beschleunigten Bewegung zeichnen. Wir erhalten eine Parabel, weil die das Gesetz wiedergebende Gleichung quadratisch ist (die Zeit t tritt im Quadrat auf). Das Diagramm finden wir auf Seite 30.

Noch etwas zum Nachdenken

Am Schluß dieses Kapitels sollen noch einige Experimente stehen, die wir zum Teil wieder nur in Gedanken durchführen. Die Antworten auf einige offengelassene Fragen stehen am Ende dieses Buches (Seite 320); dort kann jeder seine eigenen Erklärungen vergleichen und prüfen.

Wir experimentieren in Gedanken

Das ist besonders bequem – nicht nur, weil wir es im Ruhesessel ohne Geräte machen können, sondern vor allem, weil wir unangenehme Erscheinungen, beispielsweise die unerwünschte Reibung, kurzerhand hinwegdenken können. Obwohl diese Gedankenexperimente leicht den Eindruck des Spielerischen machen, üben sie das Denken und haben dadurch auch ihren Wert. Sie sind sogar oft genug notwendig – wenn man nämlich die nötigen materiellen Voraussetzungen aus zwingenden Gründen nicht schaffen kann; ihre Ergebnisse sind nicht weniger wichtig als die der „konkreten“ Experimente. Wir lassen uns daher durch den scheinbaren Gegensatz im „Experimentieren nur in Gedanken“ nicht stören und beginnen mit einigen Aufgaben.

Der Mensch im Aufzug

Ein frei fallender Körper hat kein Gewicht — ebenso wenig ein Körper, der sich im Weltraum außerhalb der Schwerfelder bewegt. Versetzen wir uns in Gedanken in einen Aufzug!

Das Gewicht ist eine Kraft, mit der der Körper, bedingt durch die Erdanziehung (Schwerkraft), auf seine Unterlage drückt. Solange der Aufzug ganz gleichmäßig, ohne Beschleunigung oder Verzögerung, fährt, ist unser Gewicht unverändert das gleiche, wie wenn wir auf der Erde ständen; vom Einfluß der Höhe (Entfernung vom Erdmittelpunkt) wollen wir hier absehen. Es ist, als stände der Aufzug still. Fährt er aufwärts mit einer Beschleunigung a , so werden wir scheinbar schwerer; ist a groß genug, so gehen wir in die Knie. Mit dieser scheinbaren Gewichtszunahme haben die Astronauten erhebliche Mühe, wenn sie abfliegen. Später dürfen sie sich dann der Schwerelosigkeit „erfreuen“ (eine reine Freude ist sie auch nicht), wenn sie der unmittelbaren Nähe der Erde entflohen sind.

Beim Aufwärts-Anfahren addieren sich die Beschleunigungen a und g (Erdbeschleunigung). Kraft ist Masse mal Beschleunigung, sagt der Physiker; $F = m \cdot b$. Unser Gewicht ist auf der Erde gleich diesem $F = m \cdot g$. Kommt die Beschleunigung a des Aufzugs hinzu, so ist unser Gewicht $F = m(g + a)$. (Das Symbol F für Kraft kommt vom englischen „force“ = Kraft.)

Viel „schöner“ ist das Gefühl, wenn der Aufzug nach unten anfährt. Dann gilt die Beschleunigung $g - a$. Dabei ist a verhältnismäßig klein gegenüber g — auch wenn unser Magen anderer Ansicht ist und uns ein merkwürdiges Gefühl verursacht. Was nun, wenn $a = g$ wird? Dann fallen wir frei und haben, wie gesagt, kein Gewicht mehr; $F = m(g - g)$ wird gleich Null, weil der Faktor $g - g$ gleich Null ist. Wir schweben im Aufzug.

Und wenn mit technischer Nachhilfe, etwa mit Strahlantrieb nach unten, a größer als g wird? Dann werden wir gegen die Decke der Fahrkabine gedrückt. Wir können uns wieder aufrecht stellen — das heißt senkrecht zur normalen Lage, mit den Füßen nach „oben“, was wir in diesem Fall als „unten“ empfinden. Diese Begriffe sind, wie wir sehen, relativ, abhängig vom Ort der wirkenden Anziehungskraft.

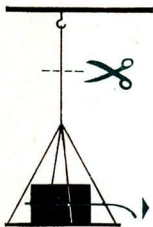
Der frei fallende Körper hat kein Gewicht

Das ist verhältnismäßig leicht zu beweisen. Wenn man einen Streifen Zeitungspapier zwischen zwei Ziegelsteine oder Metallklötze legt, so kann man ihn gewiß nicht herausziehen; er reißt. Läßt man aber das Ganze frei fallen, so hat man den unversehrten Papierstreifen in der Hand.

Die brennende Kerze im Aufzug

In einem stark beschleunigten Aufzug ändert sich eine Kerzenflamme: Sie wird zunächst etwa kugelförmig und erlischt dann. Warum?

Daß das tatsächlich so ist, läßt sich experimentell beweisen: Wir kleben am Boden eines weithalsigen Kochkolbens eine Kerze fest, entzünden sie



Zwischen den fallenden Ziegeln läßt sich das Papier leicht unversehrt herausziehen

und lassen den Kolben an einer Schnur (die ihn kurz über dem Boden fängt) schnell fallen. An Stelle des Kochkolbens kann natürlich auch eine oben offene Konservendose benutzt werden; man kann dann freilich nur das Ergebnis, nicht aber den Vorgang des Erlöschens beobachten. Um zu beweisen, daß nicht Sauerstoffmangel die Kerze erlöschen läßt, lassen wir zum Vergleich die Kerze in ihrem Gefäß eine genügend lange Zeit brennen. Die Zugluft, die die Kerze ausblasen könnte, haben wir dadurch unschädlich gemacht, daß wir die Kerze in das Gefäß stecken.

Fällt Wasser im Gefäß ebenso schnell wie das Gefäß?

Ja, beide fallen gleich schnell, obwohl die Massen beider Körper verschieden sind. Aber die Masse (m) kommt in unseren Gleichungen vom Fallgesetz nirgends vor – also kann sie beim freien Fall auch keine Rolle spielen. So aussagekräftig sind Gleichungen! Selbstverständlich untersuchen wir die Sache mit einem Experiment:

Eine Konservendose ist für den Versuch gut geeignet; wir lassen sie, mit Wasser halb oder zu drei Vierteln gefüllt, an einer Schnur fallen. Das Wasser bleibt beim Fall im Gefäß. Das Ergebnis überrascht uns nicht. Das Gefäß nimmt seinen Inhalt sozusagen mit; wir wissen ja, alle Körper fallen gleich schnell.

Wir erweitern nun den Versuch, indem wir unten in das Gefäß ein kleines Loch bohren. Nach dem Füllen mit Wasser läuft (wir wissen, warum) ein Wasserstrahl heraus. Jetzt fällt das Gefäß mit Loch und Wasser: Während des Fallens bleibt das Wasser im Gefäß, und aus dem Loch kommt nichts mehr heraus! Wie erklärt sich diese Erscheinung?

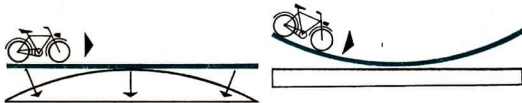
Im Padelboot durch den Tunnel?

Wir bohren in Gedanken einen geradlinigen, wasserdichten Tunnel in Form einer Kreissehne durch die Erde, 100 km lang. Man kann in seiner ganzen Länge durch ihn hindurchsehen. Dann füllen wir den Tunnel mit Wasser, so daß dieses an den beiden Tunnelenden etwa 50 cm hoch steht. Die Frage: Kann man mit einem Padelboot durch diesen Tunnel fahren?



Die Täuschung der Waagerechten

Als waagrecht (zum Beispiel eine Straße ohne Gefälle) empfinden wir das, was den gleichen Abstand vom Erdmittelpunkt hat. Das ist aber nicht



Die Täuschung der Waagerechten

geradlinig oder geradflächig, sondern wie die Erdoberfläche gebogen. Wir wissen das aus eigener Anschauung meist nur von einer sehr großen Wasserfläche, etwa der Ostsee, her. Von einem ankommenden Schiff sieht man zuerst die Mastspitzen; allmählich erhebt sich dann das ganze Schiff über dem Horizont, es kommt hinter der gewölbten Wasserfläche hervor.

Das alles ist bekannt. Unsere Frage lautet nun: Was empfindet ein Radfahrer, der auf einem geradlinigen Brett von 100 km Länge fährt? Diese Frage hängt mit den beiden vorigen Gedankenexperimenten eng zusammen.

Die Täuschung der Parallelen

Allmählich wird die Sache peinlich – aber unsere Vorstellungen von waagrecht, senkrecht und parallel werden recht zweifelhaft, wenn wir einmal in größeren als unseren alltäglichen Maßstäben denken. Unser Leben wird trotzdem nicht schwieriger werden; wir werden wissen und die Wirklichkeit mit anderen Augen ansehen.

Senkrecht steht ein Turm, wenn seine Verlängerung „nach unten“ zum Erdmittelpunkt führt. In Dresden steht ein senkrechter Turm, in Rostock ein anderer. Stehen sie parallel zueinander? Das ist die Frage. Rostock liegt um etwa 3 Breitengrade nördlicher als Dresden. Und wenn die Türme nicht parallel stehen – wie groß ist die Abweichung der Turmspitzen bei 100 m Turmhöhe?

Wenn die Erdanziehung verdoppelt würde . . .

. . . Was geschähe dann? Es ist reizvoll und lehrreich, sich das auszumalen.

Wie schwer wären wir selber?

Würde sich die Leistungsfähigkeit von Wasserkraftanlagen und Windmotoren verändern?

Wie würden Pendeluhrn und Armbanduhren reagieren?

Könnte man eine Ware noch mit einer Federwaage ebenso gut wie mit einer Hebelwaage wägen?

Wie würden sich die Antriebsmotoren von Wasserpumpen und Luftpumpen verhalten?

Wer zieht den Mond mehr an, die Erde oder die Sonne?

Wir wissen, daß sich die Massen gegenseitig anziehen. Newton drückte das in seinem Gravitationsgesetz so aus: Die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern entspricht unmittelbar dem Produkt ihrer Massen m_1 und m_2 und umgekehrt dem Quadrat ihres Abstandes r voneinander, also $\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$.

Der Abstand zwischen Sonne und Mond ist 400mal so groß wie der Abstand Erde–Mond. Die Masse der Sonne ist rund 320000mal so groß wie die Masse der Erde. Zu wem fühlt sich der Mond mehr hingezogen?

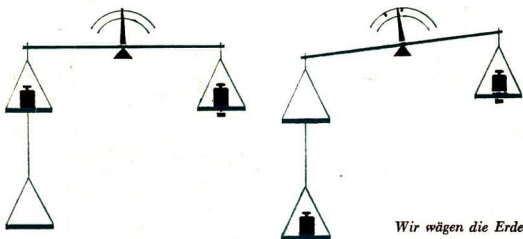
Kann man die Erde auf der Erde wägen?

Doch, man kann – so unglaublich das auch erscheint, man muß nur in Zusammenhängen denken können! Hierher gehören nämlich unsere Schwerkraft-Kurve (Seite 20) und das Gravitationsgesetz von Newton. Wir experimentieren in Gedanken so:

Entfernt sich eine Masse vom Erdmittelpunkt, so nimmt ihr Gewicht ab (und zwar mit dem Quadrat der Entfernung, wie Newton feststellte). Wir nehmen eine merkwürdige Balkenwaage: Sie hat auf der einen Seite zwei Waagschalen; die untere hängt an einem Draht 5 m tiefer als die obere. Ohne Belastung muß die Waage genau auf Null stehen; das Gewicht der zweiten Waagschale links wird durch das einer gleich großen zusätzlichen Masse an der rechten Schale ausgeglichen.

In die linke obere und in die rechte Waagschale wird je 1 kg Masse gelegt; die Waage bleibt in Nullstellung, denn beide Massen sind vom Erdmittelpunkt gleich weit entfernt. Jetzt legen wir die linke Masse in die 5 m tiefere Schale: Unsere höchstempfindliche Waage neigt sich. Die linke Masse ist um 1,5 mg (Milligramm, tausendstel Gramm) größer geworden, weil sie näher an den Erdmittelpunkt gerückt worden ist. Diese Messung, für uns natürlich undurchführbar, ist tatsächlich gemacht worden!

Aus der (durch die veränderte Schwerkraft verursachten) Gewichtsdivergenz der linken Masse (die ja mit 1 kg genau bekannt ist) kann man mit Hilfe der Gravitationsgleichung die Masse der Erde berechnen. Sie beträgt etwa $6 \cdot 10^{24}$ kg, das ist eine 6 mit 24 Nullen! Umgerechnet auf t (Tonne = 1000 oder 10^3 kg) sind das immer noch $6 \cdot 10^{21}$ t; die Erde ist eben ein recht ansehnlicher Brocken.



Wir wägen die Erde

Wieviel wiegen wohl . . .

. . . tausend Stahlkugeln von je 1 mm Durchmesser? Wir verschätzen uns mit Sicherheit „nach oben“, wenn wir uns die Kugeln nicht zu einem Würfel zusammengelegt denken. Dazu muß man wissen, daß ein Kubikzentimeter Stahl 7,5 p wiegt. Wieviel wiegt eine Million dieser Stahlkugeln?

Zwei Kugeln aus gleichem Werkstoff (aus welchem, spielt keine Rolle) liegen vor uns; ihre Durchmesser verhalten sich wie 1:2. Wie verhalten sich die Gewichte der beiden Kugeln zueinander? Darf man sagen: „Die eine Kugel ist doppelt so groß wie die andere“?

Wie groß ist der Gewichtsunterschied einer Masse von 1 kg am Äquator und am Pol?

Wann wischt die kluge Hausfrau (mit feuchtem Lappen natürlich) im Wohnzimmer Staub: abends oder morgens? Das hängt auch mit Gewicht zusammen!

Was die Welt bewegt

Kraft war es, die unsere Schlüssel herabfallen ließ – die Massenanziehung der Erde. Was ist das überhaupt, eine „Kraft“?

Kraft braucht man, um ein Stück Eisen zu biegen, einen wassergefüllten Eimer zu heben, einen Wagen zu bewegen; ohne Kraft kann man nicht arbeiten, nichts leisten. Ist Kraft also Voraussetzung? Sie ist mehr: *Sie ist Ursache jeder Bewegungs- oder Formänderung.*

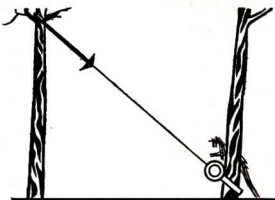
Die Kraft steckt nicht in der Schlüssel, im Eisen, im Eimer oder im Wagen; diese Dinge wollen – wie alle Körper – ihre derzeitige Form, Ruhe oder Bewegung, für alle Zeiten beibehalten – wie ein Mensch, der zu träge ist, sein weiches Bett zu verlassen. Trägheit (Beharrungsvermögen) nennt man auch diese Eigenschaft der Dinge – oder sagen wir physikalisch genauer: jeder Masse –, ihren augenblicklichen Zustand beibehalten zu wollen. Aber die Kräfte, die so oft von außen herankommen, lassen das nicht zu; sie formen die Masse oder bewegen sie.

Wir haben das ja selber versucht: eine Masse in der Luft losgelassen. Die Masse, etwa eine Kugel, hat (wie alle Massen) selber keine Kraft in sich, aber sie ist im Bereich der Erdanziehung, und die ist eine Kraft – eine sehr bedeutende sogar. Wenn eine Kraft aber auf einen beweglichen Körper einwirkt, dann bewegt dieser sich auch, und zwar immer schneller, also beschleunigt, solange die Kraft auf ihn einwirkt. Hört diese Einwirkung auf, dann bewährt sich die Trägheit der Masse wieder: Der Körper behält die letzte Geschwindigkeit bei – für immer, wenn nicht andere Kräfte dagegenarbeiten. Wir kennen das von der geneigten Ebene und den Luftreibungsversuchen her. Die *Reibung* ist allgegenwärtig, wo sich etwas bewegt; sie

Verformung einer Holzleiste durch ein Wägestück (a) und Muskelkraft (b)



So wird eine Kraft gezeichnet
und anschaulich gemacht



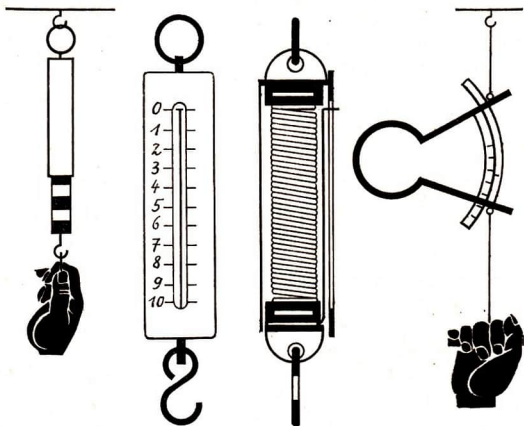
hebt immer einen Teil der antreibenden Kraft auf. Da aber eine Kraft nur von einer anderen Kraft beeinflusst werden kann, muß auch die Reibung eine Kraft sein.

Es gibt viele Arten von Kräften; deshalb ist es so wichtig zu begreifen, was eine Kraft grundsätzlich ist. Wir werden noch manche Arten selber untersuchen. Die *Trägheit* beispielsweise beeinflußt Bewegungen oft sehr erheblich; Bewegungsänderung ist stets Kraftwirkung – also wirkt die Trägheit auch als Kraft, ähnlich wie die Reibung. Die *Fliehkraft* ist Trägheitskraft eines Körpers, der im Kreise herumgeschleudert wird.

Dann gibt es Molekularkräfte, elektrische Kräfte und andere, Anziehung und Abstoßung – aber immer läßt sich das auf eine erfreulich einfache Tatsache zurückführen: Jede Kraft hat eine Größe, eine Richtung und Wirkungsline sowie einen Angriffspunkt. Durch diese Merkmale ist eine Kraft eindeutig angegeben; sie kann jetzt als Pfeil gezeichnet werden: Die Richtung des Pfeiles gibt die der Kraft an; die Verlängerung (nach beiden Seiten) ist die Wirkungsline (in der obenstehenden Abbildung das Seil zum Baum rechts unten); die Länge des Pfeiles kennzeichnet die Größe der Kraft – dabei kann man den Maßstab zweckentsprechend wählen.

Von der Einheit der Kraft

Kräfte sind nicht sichtbar, sondern nur an ihren Wirkungen zu erkennen. Sie sind, solange wir richtig mit ihnen umgehen und ihren Gesetzen gehorchen, geduldig und hilfsbereit. Sie lassen sich übertragen, zerlegen, zusammensetzen und auch gut messen. Um Gewichte und Zugkräfte zu messen, haben wir die Maey'sche Federwaage, die technische Federwaage und den Bügel-Kraftmesser. Mit ihnen kann man bequem Zugkräfte messen. Man nutzt dabei die Tatsache aus, daß jede Kraft eine gleich große Gegenkraft erzeugt: hier in der Feder, die auseinandergezogen wird und wieder in den alten Zustand zurück will. Hier wirkt diesmal keine Trägheit, sondern die Elastizität. Entsprechend drückt man eine Feder zusammen, wenn man eine Druckkraft messen will.



Maeyische Federwaage, „Lumpenwaage“ und Bügel-Kraftmesser

Wir bauen eine Federwaage

Die einfachste Bauart ist eine Zugfeder, die man an einem starken Stab vor einem senkrechten Brett oder zwischen zwei Auflagen aufhängt. Die Schraubenfeder wird an beiden Enden zu je einer Öse umgebogen; unten wird an drei Fäden eine Waagschale angehängt. Ein ebenfalls am unteren Ende der Feder angebrachter Zeiger aus Pappe oder Draht spielt über einer seitlich angebrachten Skale. Geeicht wird das Gerät mit Hilfe von Wägestücken mit zuverlässiger Genauigkeit.

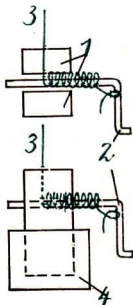
Von den beweglichen Maeyischen Kraftmessern bauen wir zweckmäßigerweise gleich mehrere. Die Anordnung geht aus den obenstehenden Abbildungen hervor: In einem Deckrohr aus festem dunklem Papier oder dünnem Karton bewegt sich die Skalenhülse (Innenhülse) aus festem weißem Papier. Die untere Öffnung der Skalenhülse und die obere des Deckrohrs werden durch je einen Kork verschlossen. Die Skalenhülse trägt, wie der Name schon sagt, eine Skale.

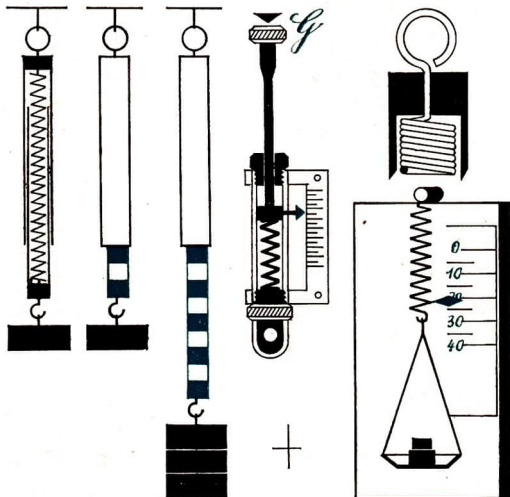
Die lichte Weite des Deckrohrs ist bei den üblichen Kraftmessern 10 mm, der äußere Durchmesser der Skalenhülse 8 mm, die Länge des Deckrohrs 160 mm. Die Hülse kann man so herstellen: Man wickelt auf einen Stab aus Holz oder Glas von 10 mm Durchmesser schwarzes, auf einen Stab von 7 mm Durchmesser weißes Papier unter ständigem Verleimen der einzelnen

Lagen auf, bis die Hülse etwa 1 mm stark ist. Die Skalenhülse darf bei Gebrauch nicht einknicken. Die beiden Korken, etwa 10 mm hoch, richtet man am besten mit Feile und Messer schwach konisch her, so daß sie etwa zur Hälfte in ihre entsprechende Hülse hineinragen. Als Federdraht ist harter Messingdraht oder Stahldraht geeignet; sein Durchmesser richtet sich nach dem Meßbereich, den wir haben wollen. Bei Stahldraht wird für 100 p ein Durchmesser von 0,5 mm, für 1 kp ein Durchmesser von 1 mm verwendet. Das obere Ende der Feder wird zum gedachten Mittelpunkt des Federquerschnitts und dort im rechten Winkel nach außen gebogen. Außerhalb des Korkens bildet es dann als Abschluß einen Ring zum Aufhängen. Das untere Ende läuft entsprechend in einen Haken aus. Bei dünnen Drähten empfiehlt es sich, den Federdraht nur fest in dem Korken zu verankern und Ring und Haken aus Eisendraht gesondert anzufertigen und in dem Korken zu befestigen. Am schwierigsten ist das Beschaffen der Schraubenfeder. Wenn man sie nicht in den passenden Abmessungen erhält und sich nicht mit Gummibändern (Schnipsgummi) als Ersatz behelfen will, dann kann man sie selber herstellen. Einige Sorten von Stahldraht lassen sich durch Glühen in der Gasflamme ent härten und nach dem Formen (Wickeln) wieder in Wasser oder Öl härten; der Stahl darf dabei nicht spröde werden. Für den Fall, daß sich der Draht nicht ent härten läßt (Naturhärte), seien hier zwei Möglichkeiten angegeben, den widerspenstigen Draht zu zähmen.

Wer eine Drehmaschine zur Verfügung hat, spannt einen Metallstab (dicken Draht) von etwa 4 mm Durchmesser ein. An einem Ende hat der Stab ein Loch; durch dieses wird der Federdraht etwa 5 cm lang hindurchgesteckt. Nun läßt man die Maschine (sehr langsam!) laufen und den Stahldraht aufwickeln – Windung dicht neben Windung. Mit den Händen zieht man den Draht zwischen zwei Hölzern sehr stramm; die Hände liegen auf dem Support, und der Vorschub ist auf die Dicke des Drahtes eingestellt. Auf diese Weise entsteht die Schraubenfeder für Zugkraftmesser. Will man einen Druckkraftmesser bauen, so legt man die einzelnen Windungen nicht aneinander, sondern einige mm auseinander; sie sollen sich ja zusammen drücken lassen.

Wer keine Drehmaschine hat, kann es (nach E. Krumm) mit Schraubstock und zwei Holzleisten so machen, wie die nebenstehende Abbildung es zeigt: Jede Holzleiste (1) erhält eine Querrinne, winklig (mit Säge) oder fast halbrund (mit Rundraspel), mit einem Durchmesser von 5 mm, aber nur 2 mm tief. Der Stab, diesmal entsprechend länger, wird an einer Seite zu einer Kurbel (2) umgebogen. Den Anfang des Stahldrahtes stecken wir wie vorhin durch ein Loch im Stab, oder wir winden ihn um die Kurbel. Dann wickeln wir einige Windungen um den Stab und legen das Ganze so zwischen die Holzleisten, daß der noch aufzuwickelnde Draht etwa in der Mitte der Holzleisten eingeführt wird (3). Die Holzleisten werden – die Rinnen genau einander gegenüberliegend – fest in einen Schraubstock gespannt (4). Nun sitzt der Stab mit den ersten Windungen fest zwischen den Leisten in den Rinnen. Wenn wir die Kurbel drehen, so schraubt sich der Stab mit den Windungen aus seinem Lager heraus. Er ist zur Schraube geworden, und





Die Schraubenfeder wird durch verschiedene Kraftwirkungen entsprechend auseinandergezogen; daneben: Druckkraftmesser und feststehende Federwaage

die Windungen haben sich so fest in das Holz gepreßt, daß dieses zur Schraubenmutter geworden ist. In jedem Fall müssen wir berücksichtigen, daß sich die Windungen beim Abnehmen etwas ausdehnen; der Stab muß also etwas dünner sein, als es die mathematische Rechnung verlangt.

Wir bestätigen das Hookesche Gesetz

Das Gesetz besagt: Die Schraubenfeder dehnt sich dank ihrer Elastizität verhältnismäßig zur Belastung aus.

Die Feder muß dazu gleichmäßig gewickelt sein, und wir dürfen sie nicht gar zu lang ziehen – sie muß immer noch in ihre alte Lage zurückkehren, wenn die Belastung fortgenommen wird.

Zum Versuch eignet sich unsere Federwaage (siehe Seite 38) gut; nötig sind einige geeichte Wägestücke. Belasten wir mit 5 p, so erhalten wir eine bestimmte Verlängerung der Feder mit der entsprechenden Zeigerstellung. Verdoppeln, verdreifachen usw. wir die Belastung, so verdoppelt, verdreifacht, vervierfacht sich auch die Verlängerung der Feder. Dadurch wird die Skale an dem Gerät so angenehm „linear“, das heißt gleichmäßig unterteilt. Welche Wägestücke wir nehmen, das hängt vom Meßbereich unseres

Zugkraftmessers ab; den Meßbereich wollen wir nicht überschreiten, damit die Feder nicht zu sehr gedehnt wird. Alle diese Meßgeräte messen die Kraft in Einheiten, in Kilopond (kp) oder Pond (p). Nach dem neuen physikalisch-technischen Maßsystem gibt es *sechs Grundeinheiten*:

Für die Länge l	das Meter (m)
die Zeit t	die Sekunde (s)
die Masse m	das Kilogramm (kg)
die elektrische Stromstärke I	das Ampere (A)
die Temperatur T	den Grad Kelvin (K)
die Lichtstärke I	die Candela (cd)

Von diesen sechs Grundeinheiten brauchen wir hier zunächst nur die ersten drei; wir kennen sie auch längst. Wo bleibt aber jetzt die Kraft? Wir erinnern uns hier einer sicher bekannten Formel: $F = m \cdot b$ Kraft = Masse mal Beschleunigung. Das ist eine sehr sinnfällige Erklärung, vor allem für den Kraftfahrer. Die Masse ist eine Grundeinheit, und die Beschleunigung hängt doch mit Länge und Zeit zusammen!

Früher wurde zwischen Masse und Gewicht praktisch kein Unterschied gemacht, und die Einheit für das Gewicht war – wie bei unseren Vorfahren – das Kilogramm. Aber die Wissenschaft kennt für sich selber keine Trägheit; sie geht in ihren Erkenntnissen voran, auch wenn man dabei umlernen muß. Der Gedanke, daß das Gewicht als Kraft von der Erdanziehung abhängig und diese auf der Erde an jedem Breitengrad verschieden ist, störte doch sehr; man mußte umständlich umrechnen. Die Lösung ist einfacher, als mancher denkt, und sie geht auf die eben erwähnte Gleichung zurück: *Die Einheit der Kraft ist die Kraft, die der Masse 1 kg genau die Beschleunigung 1 m/s² erteilt.* Zu Ehren des (uns schon bekannten) englischen Physikers nannte man die Krafteinheit 1 Newton (N). Wir verwenden weiterhin das Kilopond und merken uns die Beziehung, die durch Umrechnung mit der Fallbeschleunigung entsteht: $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$. Damit wird auch klar, daß wir das Gewicht – physikalisch einwandfrei – nur auf der Federwaage messen können, das heißt bei unmittelbarem Einwirken der Erdanziehung. Bei Balkenwaagen vergleichen wir dagegen zwei Massen miteinander.

Mit g, kg, p, kp usw. kommt man auf die Dauer nicht aus; besonders die Technik braucht teils kleinere, teils größere Bereiche. Um die vielen Nullen vor oder nach dem Komma zu vermeiden, sind zu vielen Einheiten (wie g oder p) „Vorsätze“ mit Kurzzeichen vereinbart worden. Mit ihrer Hilfe kann man auch ausgefallene Größen leicht angeben; es handelt sich dabei stets um dezimale Vielfache und Teile, zunächst mit Zehner-Sprung, dann mit Tausender-Sprung. Die folgende Tafel gibt eine Übersicht. Der Vorsatz wird, wie der Name sagt, einfach der Einheit vorgesetzt; beispielsweise ist ein Megagramm (1 Mg) gleich 1000000 (10⁶) g. Das sind zugleich 1000 kg, auch eine Tonne (t) genannt. Geläufig sind uns längst Kilogramm und Milligramm; beim Einkauf wird noch oft das veraltete Pfund für ein halbes Kilogramm im Munde geführt. Man kauft übrigens stets Massen – auf einer Hebelwaage gewogen.

Vorsatz	Kurzzeichen	Bedeutung	
Tera	T	1 000 000 000 000 (10^{12})	Einheiten
Giga	G	1 000 000 000 (10^9)	Einheiten
Mega	M	1 000 000 (10^6)	Einheiten
Kilo	k	1 000 (10^3)	Einheiten
Hekto	h	100 (10^2)	Einheiten
Deka	da	10 (10^1)	Einheiten
Dezi	d	0,1 (10^{-1})	Einheiten
Zenti	c	0,01 (10^{-2})	Einheiten
Milli	m	0,001 (10^{-3})	Einheiten
Mikro	μ	0,000 001 (10^{-6})	Einheiten
Nano	n	0,000 000 001 (10^{-9})	Einheiten
Pico	p	0,000 000 000 001 (10^{-12})	Einheiten
Femto	f	0,000 000 000 000 001 (10^{-15})	Einheiten
Atto	a	0,000 000 000 000 000 001 (10^{-18})	Einheiten

Bezeichnung der dezimalen Vielfachen und Teile von Einheiten

Druck braucht eine Fläche

Druckkraft und Zugkraft sind Kräfte – mit Größe, Richtung und Wirkungslinie; das sind klare physikalische Begriffe. Wir wollen aber nicht in der Physik stehenbleiben, sondern die Wirklichkeit unseres Lebens mit der Physik verbinden! Da zeigt sich sehr bald, daß es außerordentlich wichtig ist, wie groß die Fläche ist, auf die eine Druckkraft oder eine Zugkraft ausgeübt wird; und auf irgendeine Fläche müssen diese Kräfte wirken, um ihren Daseinszweck zu erfüllen. Wir sagen: Sie werden auf eine Fläche „bezogen“. Solche Beziehungen sind mathematisch ein Quotient; wir kennen das von der Geschwindigkeit her.

Druck ist also $\frac{\text{Druckkraft}}{\text{Fläche}}$, Zug ist $\frac{\text{Zugkraft}}{\text{Fläche}}$. Die gebräuchlichen Einheiten

dafür sind $\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ und $\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$. Sie sind für Druck und Zug gleich; nur die Rich-

tung der Kraft ist entgegengesetzt. Warum die Größe der Fläche so wichtig ist, ist leicht begreiflich: Eine Druckkraft, die, auf 1 cm² bezogen, einen großen Druck ergibt, wird zu einem ganz kleinen Druck, wenn sie auf eine große Fläche wirkt; und eine unscheinbare Druckkraft erzeugt auf einer winzigen Fläche einen sehr großen Druck.

Der Techniker spricht bei seinen Maschinen mit Recht von Druck; er sieht nicht die physikalische Kraft, sondern ihre Wirkung auf eine Fläche. Er ist dafür verantwortlich, daß die Fläche den Druck aushält; die Belastbarkeit ist eine wichtige Größe in der Technik, und zwar als Druckfestigkeit, Zugfestigkeit und Knickfestigkeit.

Wir untersuchen Druckkraft und Druck

Man kann sich den Unterschied zwischen der (ursprünglichen) Druckkraft und dem (auf eine Fläche bezogenen) Druck sehr leicht und schnell klar-machen. Wir nehmen ein Massestück von 10 kg und wägen sein Gewicht auf der Federwaage. Ergebnis: etwa 10 kp, denn in unseren Breiten macht sich der Unterschied zwischen Masse und Gewicht erst in der dritten Stelle hinter dem Komma bemerkbar. Wir erinnern uns: Am 45. Breitengrad sind beide verabredungsgemäß gleich. Jetzt stellen wir das Wägestück auf den Kopf, das heißt auf den Griff. Angenommen, der Griff hat eine ebene Kreisfläche mit 2 cm Durchmesser (sonst bliebe das Wägestück ja nicht auf dem Kopf stehen), dann wirkt die Druckkraft 10 kp auf eine Fläche der Unterlage von $r^2 \cdot \pi = 3,14 \text{ cm}^2$; die Größe des Druckes ist dann $10 \text{ kp} / 3,14 \text{ cm}^2 = 3,18 \text{ kp/cm}^2$. Stellen wir das Wägestück „richtig“ hin, das heißt auf seine Bodenfläche von beispielsweise 6 cm Durchmesser, dann ergibt sich eine gedrückte Fläche von $3^2 \cdot \pi \text{ cm}^2 = 28,26 \text{ cm}^2$; das ist nur etwa ein Zehntel des Druckes beim „kopfstehenden“ Wägestück! Wir wollen hierzu wieder einige Gedankenexperimente anstellen:



Der Boden wird belastet

Was belastet den Boden stärker: Wir selber, wenn wir auf einem unserer Absätze stehen, oder ein mittelgroßes Haus? Es genügt schon ein „richtiger“ Absatz von 50 cm^2 bei einem Körpergewicht von 75 kp. Es gab einmal „moderne“ Absätze (bei Damenschuhen) mit $0,25 \text{ cm}^2$ Fläche!

Wir brauchen eine Versuchsperson

Wir verbinden jemandem die Augen und legen ihm ein Stück Holz oder einen Pappkarton auf die eine Hand und ein Stück Blei vom gleichen Gewicht auf die andere. Auf die Frage, welches schwerer sei, wird er das Bleistück nennen. Warum? Nun hängen wir insgeheim beide Gegenstände einzeln an gleichartigen Schnüren auf und geben dem Betreffenden in jede Hand eine der Schnüre (er darf wieder nichts sehen können, sondern soll nach dem Gefühl abschätzen). Was wird er jetzt sagen?

Das druckfeste Ei

Ein normales, heiles Hühnerei hält durch seine abgerundete Form so viel Druck aus, daß wir es in der Hand nicht zerdrücken können.

Der kluge Fakir

Wer kennt nicht die zahlreichen Witze mit einem indischen Fakir? Ein solcher Mensch legt sich auf lauter Nägel, die mit der Spitze nach oben aus einem Brett ragen, und er fühlt sich dabei offenbar so wohl wie unsereins auf einer guten Matratze. Dem Betrachter läuft es kalt den Rücken hinunter – mit Recht?



Die gewaltige Nadel

Näher liegt die Frage, welchen Druck man ausübt, um eine Nadel in einen Kork zu treiben. Die Druckkraft ist schnell gemessen: Einen Kork auf die Briefwaage (mit größerem Meßbereich) legen, die Nadel hineindrücken und die Kraft ablesen; Beispiel: 500 p. Nehmen wir die Nadelspitze als Kreisfläche mit einem Durchmesser von 0,1 mm an, so erhalten wir nach der Gleichung $A = r^2 \cdot \pi$ eine Fläche von 0,00775 mm², also etwa 0,01 mm². Wie groß ist der Druck? Das Ergebnis verblüfft. Man versteht, daß solche Dinge in der Technik – nicht nur bei Nähmaschinen – sorgfältig berechnet werden müssen, wenn solche Kräfte erzeugt und aufgefangen werden sollen; nicht ohne Grund bemüht sich die Technik um immer neue Werkstoffe mit noch besseren Festigkeitseigenschaften. Bei den Überlegungen zu dieser Aufgabe wird noch mehr deutlich: Damit beim Nähen das andere Ende der Nadel (mit der Öse) nicht mit einem ähnlich großen Druck in den Finger eindringt, benutzt man den Fingerhut, der die Druckkraft auf eine größere Fläche verteilt und dadurch den Druck auf den Finger sehr herabsetzt. Daß man eine Druckkraft so auf eine kleine Fläche zusammenballen und dadurch scheinbar verkleinern kann – das ist eine sehr wichtige Erkenntnis.

Dabei bleibt die Kraft unverändert. Die Natur verschenkt nichts auf unseren Wunsch; die Summe der gesamten Kräfte bleibt stets gleich – ebenso wie die Summe der Massen. Nicht der Physiker hat den Vorteil von solchen Kunstgriffen, sondern der Praktiker, der Techniker. Weshalb haben die Reißnägel breite Köpfe? Können wir kopflose Zierleistennägel mit der Hand eindrücken? Was würde der Turner sagen, wenn wir ihm zumuteten, seine Übungen an einem 3 mm dicken Stahldraht statt an der üblichen Reckstange zu machen?

Bei den spangebenden (stoffzerstörenden) Werkzeugen spielt das alles eine große Rolle: beim Schneiden und Scheren mit Meißel, Bohrer, Fräser, Gewindeschneider usw. an den entsprechenden Maschinen. Auch hier wird die Druckkraft zu großem Druck zusammengefaßt, in eine kleine Fläche gedrängt. Freilich erstreckt sich dann auch die Wirkung nur auf diese kleine Fläche; jeder Vorteil muß irgendwie bezahlt werden! Bei den Werkzeugmaschinen arbeitet man daher mit möglichst großen Geschwindigkeiten; dadurch gleicht man die kleine Augenblickswirkung wieder aus. Wenn wir einen Kraftwagen im Ganzen heben oder ein großes Metallstück pressen wollen, dann versagt unser Verfahren der kleinsten Fläche; hier brauchen wir großen Druck *und* große Fläche. Wir erinnern uns: Hier benutzt man Flüssigkeiten, vorwiegend Öl, in *hydraulischen Pressen*; man bezahlt den Gewinn an Kraft mit dem entsprechend längeren Weg des kraftaufnehmenden Kolbens. Der kraftabgebende Kolben, der den Wagen hebt, hat eine wesentlich größere Fläche als der andere; im Verhältnis dieser Flächen ändert sich der Druck, und im gleich großen, aber umgekehrten Verhältnis unterscheiden sich die Wege beider Kolben. Flüssigkeiten lassen sich hier gut verwenden, weil sie sich so gut wie nicht zusammendrücken lassen und den Druck gleichmäßig nach allen Seiten fortleiten. Wie steht es nun mit

den zusammendrückbaren Gasen, beispielsweise mit der Luft? Kann man ein Kind von 30 bis 40 kp Gewicht mit vier Kinderluftballonen emporheben, wenn man sie gleichmäßig und gleichzeitig aufbläst?

Der kluge Brückenwärter

Eines Tages fuhr ein vollbeladener Langholzwagen über eine ziemlich kurze und schwache Brücke; der Brückenwärter, der etwas von Physik verstand, hatte nichts dagegen. Etwas später kam ein Lastkraftwagen, beladen mit Maschinenteilen, die etwa gleich schwer wie die Langhölzer waren. Hier erhob der Wärter Einspruch, und der Fahrer mußte eine Umleitung über eine stärkere Brücke fahren. Warum?

„Leichte“ Traktoren

Warum haben Traktoren so große und breite Hinterräder und oft sogar Laufketten?

Die aner kennenswerte Trägheit

Nachdem wir uns in den vorhergehenden Abschnitten so „kraftvoll“ betätigt haben, dürfen wir uns getrost einmal der Trägheit hingeben. Bei dieser Gelegenheit wird diese Trägheit einiges von ihrem schlechten Ruf verlieren – wir werden sie von einer durchaus brauchbaren, aner kennenswerten Seite kennenlernen.

Leonardo da Vinci (1452 bis 1519) war ein großer Maler, Bildhauer, Physiker und Techniker; er versuchte alles, was er beobachtete, auch zu verstehen. Besonders hatten es ihm die Erscheinungen angetan, die er als „Paradies der Mathematiker“ bezeichnete und die wir heute in dem Begriff „Mechanik“ zusammenfassen: die Lehre von den Kräften und Bewegungen. Dabei fiel ihm auch das Bestreben der Körper auf, ihren augenblicklichen Zustand der Ruhe oder Bewegung so lange beizubehalten, bis eine Kraft von außen sie dabei störte.

Wenn Leonardo heute in einem Wagen der Berliner S-Bahn führe, der mit Quecksilberdampf-Leuchtröhren beleuchtet ist, so würde er beobachten, was ältere Berliner Leser noch erlebt haben: die rollende Quecksilberkugel in der Röhre. Fährt der Zug an, so rollt sie nach hinten (Richtung Zugende); bremst der Zug – manchmal so leicht, daß wir selber es gar nicht spüren –, so rollt das Kügelchen nach vorn. Wird die Fahrt schneller, so rollt die Kugel wieder zurück. Sie gibt ein getreues Abbild nicht der Geschwindigkeit, sondern jeder Änderung der Geschwindigkeit, also der Beschleunigung. (Wir wissen: Verzögerung ist negative Beschleunigung.)

Leonardo hat das Beharren des Zustandes schon als Naturgesetz erkannt: „Naturgemäß verlangt ein jedes Ding, sich in seinem Zustand zu erhalten.“ Er hat auch schon den dadurch klassisch gewordenen Versuch mit den Damebrettsteinen gemacht: die Steine zu einem Turm aufeinandergelegt, einen Stein mit einem dünnen Brettchen schnell seitlich hinausgeschlagen – die übrigen blieben in Ruhe; die darüberliegenden fielen natürlich „ein Stockwerk tiefer“. Der Turm blieb stehen.

Die Trägheit in der Bewegung hingegen konnte Leonardo, in damaligen Gedankengängen befangen, noch nicht richtig erkennen und erklären; er glaubte, die Körper würden durch eine „ihnen eingeprägte Kraft“ (vis

infusa) bewegt, die im Laufe der Bewegung allmählich aufgebraucht wird oder sich selbst verzehrt. Nach dieser alten Auffassung ist es so: Die bewegende Kraft „entsteht zu kurzem Leben, eilt mit Ungestüm zu ihrem ersehnten Tode und stirbt durch Freiheit“. Danach war „keine Bewegung, welche die Kraft hervorruft, von Dauer“. Dieser grundlegende Irrtum ist erst durch Galilei um 1602 überwunden worden; dieser erkannte, daß die Kraft (vor allem die Schwerkraft der Erde) von außen auf die Körper wirkt.

Auch Kepler kannte die Trägheit; aber erst Newton hat erkannt, daß sie eine Eigenschaft aller Körper ist. Er sagte so: *Jeder Körper beharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, solange die Resultierende (die Gesamtwirkung) aller einwirkenden Kräfte Null ist.* Dieses Trägheits- oder Beharrungsgesetz wird zu Ehren Newtons auch Erstes Newtonsches Prinzip genannt.

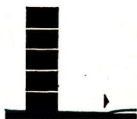
Experimente am laufenden Band

Die Größe der Trägheit ist von der Masse des Körpers abhängig; je größer die Masse, um so größer ist die Trägheit, und um so größer müssen die Kräfte sein, die die Trägheit überwinden sollen. Die Trägheit ist eine Kraft; deswegen beschäftigen wir uns hier mit ihr. Es ist noch manches dazu zu sagen; aber wir haben zunächst einige Versuche verdient.

Der Groschen fällt

Auf einem Wasserglas liegt ein Stück Karton, auf diesem ein Geldstück. Am Karton (dünne Pappe) ist ein Bindfaden befestigt. Ziehen wir den Karton langsam seitlich fort, so bleibt das Geldstück darauf liegen; ziehen wir schnell, mit einem Ruck, so macht sich die Trägheit bemerkbar, und das Geldstück fällt in das Glas, als hätte sich der Karton in Luft aufgelöst. Mancher wird auch die Pappe ohne Faden schnell genug fortziehen oder sie mit einem vorschnellenden Finger wegstoßen können. Den klassischen Versuch von Leonardo können wir leicht wiederholen: Wir bauen einen Turm aus Steinen eines Damebrettspiels oder aus Geldstücken auf dem einen Ende eines festen Papierstreifens auf. Wird der Streifen schnell genug fortgezogen, so bleibt der Turm stehen. Mit einiger Geschicklichkeit kann man mit Hilfe eines Blechstreifens oder eines Bindfadens auch irgendwo aus dem Turm einen Stein oder ein Geldstück herauschlagen; die übrigen Teile gehen infolge ihrer Trägheit nicht mit.

Legen wir einen runden Bleistift auf ein Blatt Papier und bewegen wir dieses senkrecht zum Bleistift geschickt hin und her, so rollt der Stift, bleibt aber auf seinem alten Platz (im Verhältnis zum ruhenden Tisch, nicht zum bewegten Papier!) beharrlich liegen.



Versuche zur
Trägheit

Die Münze mit dem Loch

Was ist in der Physik zugleich schwierig und bewundernswert? Die Tatsache, daß die Naturgesetze so eng miteinander verflochten sind! Es ist deshalb schwierig, ein Naturgesetz ganz allein für sich zu behandeln; angenommen müßte man mehrere nebeneinander durchdenken. Das führt meist zu einem kleinen Durcheinander; daher bemüht man sich um ein sinnvolles Nacheinander, aus dem die Verflechtung dann allmählich sichtbar wird. Hier ist ein Versuch, der mit unserer Nähnadel und ihrer mächtigen „Spitzenkraft“ und zugleich mit dem Beharrungsvermögen, also der Trägheitskraft, zu tun hat. Durch einen Korken steckt man eine etwas längere Nähnadel; die Spitze soll gerade sichtbar sein, aber nicht herausragen. Das auf der anderen Seite des Korkens herausragende Nadelstück mit der Öse brechen oder kneifen wir mit der Zange unmittelbar über der Korkfläche ab.

Nun legen wir auf eine feste Unterlage ein Brettchen aus weichem Holz, darauf die Münze, die durchbohrt werden soll – etwa ein 1-Pfennig-Stück; es darf auch eine Scheibe aus Kupfer oder Messing sein. Auf die Münze stellen wir den Korken, so daß die Nadelspitze das Metall gerade eben berührt. Nun ein senkrechter, harter Schlag mit einem nicht zu kleinen Hammer – und die Münze hat ein Loch. Die Trägheit hat (gemeinsam mit dem einhüllenden Korken) die Nadel vor dem Verbiegen und Abbrechen bewahrt; die Dauer des Hammerschlages (Krafteinwirkung!) war zu kurz, um die Trägheit zu überwinden. Im übrigen ist Nadelstahl auch wesentlich härter als Münzmetall.

Der mißbrauchte Bleistift

Er ist sicherlich nicht für diesen Versuch hergestellt; aber das, was übrigbleibt, läßt sich durchaus noch verwenden. Ein möglichst langer, neuer Bleistift soll es sein. Der eine Experimentator hält ihn an beiden Enden ganz fest; der andere schlägt mit der Handkante auf die freie Mitte des Bleistifts. Er muß kräftig, mit Schwung draufschlagen – dann zerbricht der Bleistift.

Ist es gleichgültig, wie groß die Hände sind? Wo tritt die Trägheitskraft auf?

Der zerschlagene Stab

Wenn wir einmal mit einem guten Wein Gäste erwarten, können wir den vorhergegangenen Versuch auch folgendermaßen durchführen: Wir stecken in die Enden eines dünnen, etwa 1 m langen Stabes, wie man ihn zum Anbinden von Blumen verwendet, in der Längsrichtung je eine Stecknadel. Den Stab legen wir auf zwei mit Wasser (oder auch schon mit Wein) gefüllte Weingläser, so daß er mit den Nadeln auf den Rändern der Gläser liegt. Jetzt schlagen wir hart und schnell auf die Mitte des Stabes. Er zerbricht; Nadeln und Gläser bleiben heil. Dieser Versuch zeigt es wieder: Die Kraft unseres Schlages überwindet die Trägheit nur an der Schlagstelle.

Die haltbaren Papierschlängen

Dies ist wieder ein ähnlicher Versuch. Wir hängen einen Glasstreifen, etwa 50 cm lang und 1 cm breit (aus der Abfallkiste des Glasers), an den Enden in je einer Schlaufe aus feinem Seidenfaden oder aus Papier auf, Papierschlängen vom Faschingsfest sind dafür gut brauchbar. Zum Aufhängen des ganzen Aufbaues – insbesondere also der beiden Schlaufen in etwa 45 cm Abstand – eignen sich die Beine eines auf die Seite gelegten Tisches oder Sessels. Ein scharfer, kräftiger Schlag mit einem schweren Stock zertrümmert den Glasstreifen, die Papierschlängen bleiben heil. Der Grund ist der gleiche wie beim vorigen Versuch.

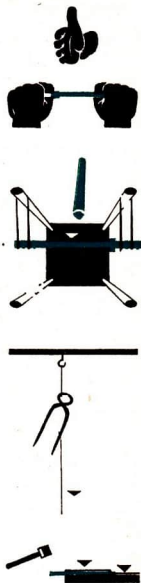
Trägheit schützt vor Schaden

Den oberen Faden in der nebenstehenden Anordnung schützt die Trägheit vor dem Zerreißen. Eine schwere Kneifzange oder eine ähnlich große Masse hängt hier an einem Faden, der sie gerade noch trägt (im Notfall genügt ein Brikett). An der Zange ist ein zweiter, gleicher Faden angeknüpft. Welcher Faden reißt, wenn wir den unteren Faden mit einem Ruck nach unten ziehen? Der obere ist durch schwere Masse schon bis dicht an die Reißgrenze belastet; er müßte doch zuerst reißen! Er tut es aber nicht, sondern der untere Faden reißt. Der Grund? Die große Masse schützt durch ihre Trägheit den oberen Faden. Ehe die Trägheit überwunden ist, ist der untere Faden bereits gerissen.

Wenn wir nun aber die Trägheit überlisten und langsam immer stärker nach unten ziehen? Dann reißt freilich der obere Faden, denn der hat außer unserer Zugkraft ja noch das Gewicht der Zange zu tragen. Und gleichgerichtete Kräfte auf derselben Wirkungslinie addieren sich (wie auf jeder Seite beim Tauziehen). Damit uns die Zange dabei nicht auf die Finger fällt, binden wir sie zusätzlich mit einem etwas längeren und stärkeren Faden fest.

Auch die Luft ist schwer und träge

Daß die Luft ein Gewicht hat, ist uns bekannt; wir werden später dazu noch einige reizvolle Versuche machen. Auch die Luft hat Masse und ist daher träge. Wie groß diese Trägheit ist, wird meist unterschätzt. Wir wollen das in zwei Versuchen beweisen. Zunächst eine besonders einfache Anordnung nicht nur für Zigarrenraucher: Wir legen einen hölzernen Zigarrenkisten-deckel, etwa 13 cm mal 24 cm groß, so auf einen Tisch, daß ungefähr ein Viertel (etwa 6 cm) über die Kante hinausragt. Über die auf dem Tisch liegenden drei Viertel des Deckels legen wir einen möglichst großen Bogen Zeitungspapier. Das Papier muß dicht auf Deckel und Tisch aufliegen. Nun schlagen wir mit der flachen Kopfseite eines Hammers kurz und kräftig auf die herausragende Deckelfläche; der Deckel bricht durch, und die bedeckte Fläche bleibt liegen. Grund: Infolge der Trägheit kann die darüberliegende Luft das plötzlich entstehende Vakuum an der Unterseite des Deckels nicht ausgleichen. Um auch eine Vorstellung von der Größenordnung zu bekom-

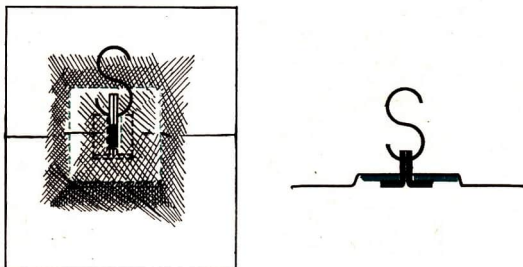


Weitere
Trägheits-Versuche

men, wollen wir einmal die Kräfte vergleichen: Der Hammer übt eine Druckkraft von – roh geschätzt – höchstens 20 kp aus. Die Luft lastet auf $40\text{ cm} \cdot 60\text{ cm} = 2400\text{ cm}^2$ mit 2400 kp! Selbst bei langsamem Hinabdrücken des Deckels merken wir einen starken Widerstand; der ist aber überwiegend auf den Luftdruck und weniger auf die Trägheit der Luft zurückzuführen. Man kann, wie gesagt, die einzelnen Kräftewirkungen nicht immer genau voneinander trennen. Das ist auch nicht nötig; wir müssen nur stets wissen, was wirkt und wie es wirkt.

Anspruchsvoller, aber auch noch wirkungsvoller ist die folgende Anordnung (nach H. H. Schulz): Eine sehr feste Platte (beispielsweise eine Hartfaserplatte), 4 mm stark, 40 cm mal 40 cm groß, soll unter Zeitungspapier hochgerissen werden. Zu diesem Zweck müssen wir einen festen Griff in der Mitte anbringen. Hier sind der schöpferischen Phantasie des Lesers keine Grenzen gesetzt. Ein Vorschlag ist folgender: Wir bohren oder stemmen in die Plattenmitte ein Loch; es muß so groß sein, daß je ein Schenkel von zwei rechtwinklig gebogenen, kurzen Metallschienen hindurchpaßt. Der eine Schenkel der beiden flachen Winkelstücke schmiegt sich von unten gegen die Platte; diese Schenkel liegen in entgegengesetzten Richtungen. Die beiden anderen Schenkel ragen durch das Loch in der Platte nach oben. Hier erhalten sie eine Bohrung, groß genug, um einen kräftigen S-Haken aufzunehmen (gegebenenfalls aus einem starken Nagel zu biegen). Dann brauchen wir noch, wie die Abbildung von der Gesamtanordnung zeigt, eine Schlaufe aus einer kräftigen Schnur und einen starken Knebel, um an der Schnur ziehen zu können. Das Ganze wird auf einem glatten Fußboden aufgebaut: Hartfaserplatte mit eingesteckten Winkelstücken, S-Haken einhängen, Schlaufe mit Halteknebel. Über die Platte (und sie auf allen Seiten um mindestens 20 cm überragend) werden zwei Zeitungen so gelegt, daß sie ein Quadrat von etwa 80 cm Seitenlänge bilden. Das Papier soll so gut wie möglich an Boden und Platte anliegen. Und nun muß der starke Mann her! Er stellt sich, am besten breitbeinig, gebückt über der Zeitung auf, faßt den Knebel mit beiden Händen und reißt beim Aufrichten den Knebel mit aller Kraft mit einem

Die Luftträgheit mit verblüffender Wirkung



scharfen Ruck hoch. Die Schnur reißt! Papier und Platte bleiben ruhig liegen. Die Länge der Schnurschleife muß nach der Größe des Experimentators so bemessen sein, daß dieser seine größte Zuglast entfalten kann. Diesen Versuch kann man regelrecht üben; es wird von Experimentatoren berichtet, die auf diese Weise Schnüre bis Fingerstärke glatt durchgerissen haben! Sehr wichtig ist, daß die Zugkraft genau senkrecht zum Fußboden ausgeübt wird; daß das ganz plötzlich geschehen muß, ist schon gesagt worden. — Der Versuch eignet sich nur für kräftige Leser!

Das Trägheits-Orakel beim Ei

Etwas zum Verschnaufen nach den Anstrengungen des vorigen Versuches! Wer weiß, wie man schnell und leicht feststellen kann, ob ein Ei roh oder gekocht ist? Es kommt immerhin vor, daß beide Sorten einmal versehentlich durcheinandergeraten. Sehr einfach: Man legt das „verdächtige“ Ei auf den glatten Tisch und versucht, es mit einem Anstoß in schnelle, erst langsam abklingende Drehung zu versetzen. Tut es uns den Gefallen, so ist es ein hartes, zumindest ein weichgekochtes Ei. Wenn das Ei sehr schnell wieder zur Ruhe kommt, so ist es noch ungekocht. Warum? Im ersten Fall sind Eiweiß und Eigelb mehr oder weniger fest geworden und mit der Schale verbunden. Sie werden beim Anstoßen sofort mitbewegt; ihre Massen übernehmen mit der Masse der Schale den Impuls, und die gesamte Masse erhält durch ihre Trägheit die Bewegung, bis die Reibungskraft zwischen Tisch und Schale die Bewegungskraft aufzehrt. Ganz anders beim rohen Ei! Hier können wir zwar der Eierschale einen Anstoß (Drehimpuls) geben; aber Eiweiß und Eigelb, flüssig und mit der Schale nicht verbunden, machen nicht mit. Die Trägheit der Schalenmasse überwindet unsere drehende Hand leicht; die Massen des Eiweißes und des Eigelbs bleiben jedoch infolge ihrer Trägheit in Ruhe. Das bedeutet aber, daß sich die Schale um sie dreht. Das gibt eine sehr erhebliche Reibung, denn das Eiweiß ist recht klebrig. Und da die Masse von Eiweiß und Eigelb (erfreulicherweise) wesentlich größer als die der Schale ist, kommt diese sehr schnell wieder zur Ruhe.

Das Ei als Kraftspeicher

Das gekochte Ei dürfen wir zur Belohnung für unser Nachdenken nunmehr aufessen. Mit dem rohen Ei machen wir noch einen hübschen Versuch. So leicht man ein hartgekochtes Ei in schnelle Drehung versetzen kann, so schwierig ist das beim rohen Ei; wir wissen, warum. Trotzdem müssen wir es versuchen. Es gelingt nach einiger Mühe, wenn man im richtigen Augenblick mehrere Male erneut anstößt — so oft, bis sich auch der flüssige Ei-Inhalt mitdreht. Wenn sich das rohe Ei dann lustig dreht, halten wir es einmal ganz kurz an und lassen es danach gleich wieder los. Und das Ei dreht sich munter weiter! Warum? Wir konnten nur die Schale anhalten. Der Inhalt drehte sich ständig weiter und nahm, nachdem wir die Schale wieder freigegeben hatten, diese dank der Reibung wieder mit.



Das ist der umgekehrte Vorgang wie beim vorigen Versuch. Die kleine Masse der Schale wird von der viel größeren des Inhalts schnell mitgerissen.

Wie verringere ich mein Gewicht am schnellsten?

Dazu brauchen wir uns nur auf eine Personen-Federwaage zu stellen, unser Gewicht abzulesen und dann eine Kniebeuge zu machen. Sofort geht der Zeiger zurück! Wir müssen uns erinnern: Ein fallender Körper verliert scheinbar an Gewicht; siehe den Versuch auf Seite 32. Ein ähnlicher Fall liegt auch hier vor.

Wenn wir nach der Kniebeuge auf der Waage hocken bleiben, zeigt die Waage sofort wieder den tatsächlichen Masse- oder Gewichtswert an; dieses Verfahren nützt also auf die Dauer leider nichts.

Der umgekehrte Erfolg tritt ein, wenn wir auf der Waage plötzlich die Arme hochheben: Der Zeiger gibt während der Bewegung einen höheren Wert an. Je schneller wir uns bewegen, um so stärker ist der angezeigte Gewichtsunterschied. Je größer die Beschleunigung nach einer Seite ist, um so stärker wird die *Gegenkraft* Trägheit nach der entgegengesetzten Seite. Bei empfindlichen Waagen kann das schon durch Bewegung einer Faust oder eines Beines nachgewiesen werden. Wer genau beobachtet, wird bei der Kniebeuge folgendes bemerken: Zunächst geht der Zeiger zurück, während des letzten Teils der Kniebeuge jedoch wieder vor. Warum? Das liegt daran, daß wir den Körper während des Senkens nicht ständig gleichmäßig beschleunigen können; bevor wir unten ankommen, müssen wir die Abwärtsbewegung bremsen.

Wer noch eine alte Küchen-Federwaage mit oben aufgesetzter Schale hat, kann diesen Beschleunigungs-Trägheits-Versuch mit Hilfe eines Schraubenfederpendels machen. An einer Schraubenfeder, die in einem einfachen Holzrahmen hängt, schwingt ein Massestück auf und ab; es ersetzt hier den Menschen mit Kniebeuge und Armbewegungen. Das Ergebnis entspricht den Beobachtungen auf der Personenwaage.



Eine gleitende Schachtel fällt um

Eine Streichholzschachtel steht senkrecht auf einem Bogen Papier und wird mit diesem gleichmäßig schnell über den Tisch gezogen. Das Papier bleibt plötzlich still liegen – sofort fällt die Schachtel in der Fahrtrichtung um. Warum?

Wir haben meist einen ruhenden Gegenstand in Bewegung gesetzt; die dabei geweckte Trägheitskraft haben wir in ihren Wirkungen beobachtet. Ganz entsprechende Wirkungen erzielt man mit bewegten Körpern, wenn man deren Bewegung ändert – beschleunigt oder verzögert. Auch hier wird die Trägheitskraft wirksam – nur will sie diesmal nicht die Ruhe, sondern die Bewegung erhalten. Ein Beispiel dafür sind auch das gedrehte Hühnerei und die „Wackeltreppe“ auf dem Jahrmarkt.

Beobachtungen in Straßenbahn und Aufzug

Manchen Schiebetüren in öffentlichen Verkehrsmitteln ergeht es wie der gleitenden Schachtel. Die Wagen sind verschiedenartig gebaut; bei einigen gleitet die Tür beim Öffnen nach hinten, bei anderen nach vorn. Wenn keine Druckluftleitung das besorgt, muß die Schaffnerin oder der Fahrgast die Tür öffnen und schließen. Bremsst der Wagen an der Haltestelle in der üblichen Weise stark, so erfordert es viel Kraft, um die Tür, die sich gegen die Fahrtrichtung öffnet, während des Bremsens zurückzuziehen und dabei die Trägheitskraft zu überwinden. Läßt man sie zu früh los, so saust sie nach vorn und kann dabei allerlei Unheil anrichten. Man wartet daher am besten ab (auch wenn man es eilig hat), bis der Wagen steht. Beim Anfahren benimmt sich diese Tür wieder unangenehm, während sie doch nur dem Naturgesetz der Trägheit folgt: Sie sträubt sich gegen das Schließen. Mit der Tür am anderen Ende des Wagens ist es oft umgekehrt: Sie öffnet sich leicht beim Bremsen und schließt sich beim Anfahren. Führt der Wagen, ohne zu wenden, seinen Weg zurück, haben beide Türen die Rollen vertauscht. Der Konstrukteur muß sich auch solche Wirkungen überlegen — auch um der Sicherheit der Fahrgäste willen. Eine zweiteilige Schiebe- oder Falttür, bei der die eine Hälfte nach der einen Seite und die andere nach der anderen Seite gleitet, ist beispielsweise eine gute Lösung, vom Physikalischen her gesehen. Ähnliche Gedanken haben die Konstrukteure der Kraftwagen veranlaßt, die Türen so zu bauen, daß sich die Türflügel nach vorn öffnen. Eine sich während der Fahrt versehentlich öffnende Tür wird jetzt durch den Fahrtwind nicht weiter aufgerissen, sondern zugeedrückt.

Da wir gerade beim Kraftwagen sind: Hier spielt die Trägheitskraft ebenfalls eine sehr große Rolle. In der Garage steht der abgestellte Wagen still; darauf können wir uns dank der Trägheit verlassen. Wenn wir anfahren, kostet uns diese Kraft allerdings schon Geld: Der Motor muß sie überwinden, wenn sich der Kraftwagen bewegen soll. Ist er einmal in Bewegung, etwa mit 80 km/h auf der Autobahn, dann erweist sich die Trägheit als nützlich; nun könnten wir das Gas ganz fortnehmen, und der Wagen würde (auf ebener Straße) unentwegt mit dieser Geschwindigkeit weiterfahren — wenn nicht die Reibung wäre, die sich überall einmischt. Tatsächlich brauchen wir bei glatter, freier Fahrt nur noch so viel Antriebskraft, daß wir damit die Reibung gerade ausgleichen. Aber davon später (bei der Reibung) mehr!

Die Trägheit wird uns besonders peinlich, wenn wir unerwartet schnell anhalten müssen. Wir müssen mit Hilfe von Bremsen die Reibung als „Feindin“ der Trägheit vergrößern; wir treten energisch auf das Bremspedal. Meist genügt das; gelegentlich aber rutscht der Wagen — oder er überschlägt sich gar; das Naturgesetz kennt kein Erbarmen, wenn man es nicht beachtet.

Nun zum Aufzug! Wenn wir senkrecht im Aufzug fahren, machen wir die gleichen Erfahrungen mit der Trägheit, nur daß die Kraft jetzt nach unten oder nach oben in uns wirkt. Bei dem Abschnitt über die Erdanziehung ist schon davon die Rede gewesen. Daß Trägheit und Erdanziehung zusam-

mengehören (was gehört in der Natur nicht zusammen?), ist leicht einzusehen: Trägheit ist eine Eigenschaft der Masse; durch die Trägheit wird das Gewicht unseres Körpers beim Beschleunigen des Aufzugs scheinbar größer oder kleiner; Gewicht ist Masse mal Erdbeschleunigung.

Wir können die physikalischen Wirkungen beim Fahren im Aufzug zusammenfassen:

Beim *Anfahren nach oben*: Erdbeschleunigung plus Fahrbeschleunigung. Gewicht wird größer;

bei *gleichmäßiger Fahrt*: Nur gewohnte Erdbeschleunigung, Gewicht normal;

beim *Bremsen nach oben*: Erdbeschleunigung plus negative Fahrbeschleunigung, also physikalisch: Erdbeschleunigung minus Fahrbeschleunigung, Trägheit zieht Körper hoch, Gewicht wird kleiner;

beim *Anfahren nach unten*: wie oben, Gewicht wird kleiner;

beim *Bremsen nach unten*: Erdbeschleunigung plus Trägheit, Gewicht wird größer.

Reißt das Seil und versagen alle Sicherheitsbremsen (ein rein theoretischer Fall), dann saust der Aufzug im freien Fall abwärts, und die Insassen haben kein Gewicht mehr; der Aufzug läuft der Erdanziehung gewissermaßen weg. Wie ändert sich das Gewicht des Menschen, wenn der Aufzug mit Erdbeschleunigung nach oben saust? Tiere nutzen die Trägheit vielfach aus – instinktiv. Ein Karpfen an der Angel wirft den Schwanz nach oben; dadurch vergrößert er sein Gewicht, und die Angelschnur kann reißen. Eine Katze fällt immer auf ihre Füße; das ist bekannt. Aber wie macht sie das? Angenommen, sie droht auf die linke Flanke zu fallen, dann muß sie ihren Körper um 90° nach rechts drehen. Sie erreicht das durch eine scharfe Drehung ihres aufgestellten Schwanzes linksherum! Die der wirkenden Kraft stets entgegengesetzte Trägheit dreht den Körper wunschgemäß rechtsherum.

Die Eichhörnchen steuern ihre Sprünge in ähnlicher Weise. Bei den Bewegungen ihres buschigen Schwanzes mag auch der Luftwiderstand noch eine gewisse Rolle spielen. Zu bewundern ist der hakenschlagende Hase – er ist ein großer Künstler im Überwinden der Trägheit! Gut, daß die Trägheit der Geschosse des Jägers ebenfalls wirkt (wie bei allen Geschossen), sonst kämen die Liebhaber von Hasenbraten zu kurz.

Von der Trägheit zur Energie

Was eine Kraft ist, wissen wir ja: die Ursache von Zustands- oder Bewegungsänderungen; sie ist an ihren Wirkungen erkennbar und meßbar und ist keine „Macht an sich“, sondern mit der Materie verbunden. Die Kraftwirkung ist die Eigenschaft der Materie, Energie zu übertragen und die schon genannten Änderungen hervorzurufen. Dabei sagt der Satz von der Erhaltung der Energie aus, daß die Summe der Energien immer gleichbleibt, auch wenn sie sich anders verteilen oder andere Formen annehmen,



wenn sich beispielsweise ein Teil der Bremsenergie in Wärmeenergie umsetzt. Robert Mayer (1814 bis 1878) fand dieses Naturgesetz 1842 als erster.

Ein reizvolles Beispiel dafür ist folgende Frage: Salzsäure löst eine Uhrfeder aus Stahl auf. Wenn wir nun diese Feder vorher ganz „aufziehen“, also spannen und in diesem gespannten Zustand (etwa mit säurefestem Plastikband gespannt gehalten) in die Salzsäure legen, dann wird sie ebenfalls aufgelöst. Wo bleibt nun die Energie, die zum Spannen nötig war? Versuche haben Überlegungen bestätigt: Aus der mechanischen Energie wird Wärmeenergie! Die Salzsäure ist am Schluß etwas wärmer, als das bei dem Versuch mit nicht gespannter Feder der Fall ist.

Jetzt wird mancher vielleicht auf die Bremse treten und fragen: Wieso plötzlich „Energie“? Wenn eine bestimmte Kraft (in kp) über einen bestimmten Weg (in m) wirkt, so sprechen wir von *Arbeit*; sie ist das Produkt aus Kraft mal Weg. (Auf eine bestimmte Zeit bezogen, etwa 1 Stunde, wird sie zur Leistung.) Verrichten wir an einem Körper, beispielsweise durch Heben, eine Arbeit, so erhält dadurch dieser Körper die Fähigkeit, selbst eine entsprechend große Arbeit zu verrichten. Diese Fähigkeit nennen wir *Energie*. Wenn also beispielsweise ein Rammbar mit 1000 kp Gewicht 5 m hoch gehoben wird, so bedeutet das eine Arbeit von $1000 \cdot 5 = 5000$ kpm (Kilopondmeter). Die Fähigkeit, diese Arbeit nun selber wieder herzugeben, steckt jetzt als *Energie der Lage* oder *potentielle Energie* im Bären drin. Wenn wir für Gewicht die Masse mal Erdbeschleunigung setzen, so sieht die mathematische Gleichung für die Lageenergie so aus (m = Masse, g = Erdbeschleunigung, h = Höhe, auf die die Masse gehoben worden ist):

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h.$$

Nebenbei bemerkt: Dadurch, daß das Hochziehen eine gewisse Zeit dauert, das Herabfallen jedoch als freier Fall beschleunigt geschieht, wird die Leistung erheblich gesteigert. Hinzu kommt, daß die *Energie der Bewegung* mit dem Quadrat der Geschwindigkeit steigt. Andernfalls wäre es einfacher, die Kraft ohne den Umweg über die Ramme unmittelbar auf das zu bewegendes Objekt einwirken zu lassen.

Auch ein Bauarbeiter verrichtet eine leicht zu berechnende Arbeit, wenn er Ziegel emporträgt; Lastenaufzüge, Transportbänder und Kräne tun ein Gleiches. Wir selber werden mit Energie „aufgeladen“, wenn wir in einer Achterbahn (die viele physikalische Gesetze offenbart, wenn man darauf achtet) hochfahren. Oben angekommen, wird die Energie der (Aufwärts-)Bewegung für ganz kurze Zeit zur Energie der Lage; sobald die Abwärts-Bewegung begonnen hat, wird die Lage-Energie nach und nach zur Energie der Bewegung, und diese Energie vermittelt uns dann ratenweise allerlei Vergnügen. Trägheit: Man muß an der richtigen Seite des Partners sitzen! Abwärts-Beschleunigung: Die Luft bleibt einem weg. Wieder Trägheit: Es geht immer langsamer aufwärts; man kann wieder Luft holen. Reibung: Man kommt nicht wieder ganz so hoch, wie man abgefahren war. Und anderes mehr...



Wie schon gesagt: Jahrmärkte sind unerschöpfliche Gelegenheiten, Naturgesetze wiederzufinden. Man denke nur an das schräg nach oben laufende Band, auf das man sich (unten) stellt – wer das nicht genau mit Laufbandgeschwindigkeit tut, kippt zur großen Freude der Zuschauer um.

Nehmen wir einmal unseren Kraftwagen als Beispiel. Wenn ein Wagen beim Bremsen schleudert, so haben wir seine Bewegungsenergie nicht genügend vernichten (besser: umformen) können; die überschüssige Energie, dank der Trägheit der Wagenmasse gut erhalten, läßt den Wagen schleudern oder gar umkippen – wenn nicht zu allem Unheil noch ein Zusammenstoß erfolgt. In diesem Fall dient die Energie zum höchst unerwünschten Verformen von Materie: von der Beule bis zum Schrotthaufen. Die mathematische Gleichung für die Bewegungsenergie (auch Wucht oder *kinetische Energie* genannt) zeigt, daß diese Energie, wie eben schon erwähnt, mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst:

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2.$$

m ist dabei die Masse, hier unseres Wagens. Und das Quadrat der Geschwindigkeit sollte zu denken geben!

Unglücklicherweise hat der Mensch im fahrenden Wagen kein eigenes Gefühl für Geschwindigkeit; er muß daher als Kraftwagenfahrer seinen Geschwindigkeitsmesser ständig beobachten – nicht nur wegen der Verkehrsvorschriften, sondern auch wegen der Naturgesetze! Oder wäre es lästig, wenn der Mensch ein Gefühl für Geschwindigkeit hätte?

Trägheit überall

Kehren wir noch einmal zur Trägheit zurück. Sie wirkt „in Arbeitsgemeinschaft“ mit der Elastizität des Werkstoffes sehr segensreich in der *Wagenfederung*. Die Federung allein (aus Blatt-, Schrauben- oder Kegelfedern) würde gar nichts nützen, wenn nicht die Trägheit die Wagenmasse gegen die Übernahme eines kurzen Stoßes schützte. So nimmt denn die Feder die Stoßkraft auf, indem sie ihre Form ändert, das heißt gebogen oder zusammengedrückt wird. Allerdings will sie die aufgenommene Energie infolge ihrer Elastizität schnellstens wieder loswerden. Sie dehnt sich also wieder nach unten aus, wenn eine kleine Erhöhung auf der Straße überfahren worden ist. Ist das Rad in ein Schlagloch geraten, so dehnt sich die Feder zunächst aus und geht dann wieder in den normalen Zustand zurück. Die luftgefüllten Reifen unterstützen in ähnlicher Weise die Trägheit und damit das ruhige Fahren. Die Luft läßt sich viel leichter zusammendrücken als eine Stahlfeder; eine auf diesem Grundsatz aufgebaute Luftfederung (mit Zylinder und Kolben) erlaubt daher ein besonders ruhiges Fahren. Die Räder springen schnell auf und ab, und der Wagen selbst liegt ruhig.

Das Pendel und seine Bedeutung (beispielsweise in Uhren) sind bekannt. Ob jeder weiß, daß es ohne Trägheit kein Pendel gäbe? Keine Schaukel?



Hier befördert die Trägheit im Verein mit der Antriebskraft (meist der Erdanziehung) die Masse über den tiefsten Punkt hinaus. Dabei muß die Antriebskraft ständig um den Teil erneuert werden, der durch die Reibung im Lager und in der Luft verlorengeht; bei der Pendeluhr besorgt das eine — durch Aufziehen mit Energie geladene — Feder oder eine entsprechend „angereicherte“ kleine Last, bei der Schaukel die Muskelkraft des Schaukelnden oder eines Helfers. Übrigens darf man hier nicht das „Gewicht“ sagen; Gewicht ist als Kraft eine Eigenschaft des Stückes. Die Last ist ein Gewichtstück.

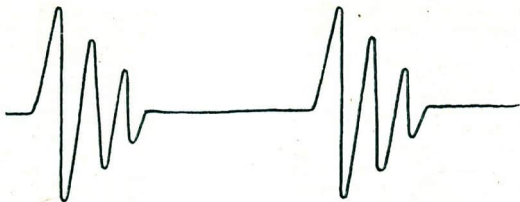


Das Pendel ist auch ein gutes Beispiel für den Übergang von der einen Energieart in die andere. Ein schwingendes Pendel hat an seiner tiefsten Stelle die größte Bewegungsenergie, den größten Schwung. Beim Aufwärtsbewegen geht diese allmählich in Ladeenergie über; an der höchsten Stelle steht das Pendel einen Augenblick still — ganz und nur mit Lageenergie geladen. Abwärts wird die Geschwindigkeit (durch die Erdbeschleunigung) wieder größer; die Lageenergie verwandelt sich in Bewegungsenergie; das Pendel saust durch den tiefsten Punkt dank seiner Trägheit hindurch, und das Spiel beginnt von neuem. Wir sehen wieder: Kräfte verschiedener Art wirken zusammen; nur durch genaues Beobachten und Nachdenken (Analysieren) kommt man hinter das Geheimnis.

Rangierer wissen, wie schwer es ist, einen Eisenbahnwagen aus dem Stand anzuschieben; seine Trägheit ist groß, und auch die Reibung in den Lagern ist größer als während des Fahrens. Sechs kräftige Männer sind dazu nötig. Ein einziger Mann kann dagegen den rollenden Wagen leicht in seiner Bewegung halten. Soll der Wagen anhalten, so muß eine Bremse benutzt werden. Wäre keine vorhanden, so wären die sechs kräftigen Männer wieder zum Anhalten nötig. Man könnte sich dabei fast vorstellen, sie hätten ihre Energie dem Wagen für eine kurze Fahrstrecke geliehen und dann zurück-erhalten. Dieses Bild ist physikalisch durchaus richtig: Die Physik ist tatsächlich weitgehend die Lehre von der Übertragung und Umformung der Energie. Bei „Umformung“ denken wir vielleicht an das früher erwähnte Prinzip der hydraulischen Presse, wo wir für einen längeren Weg eine größere Druckkraft erhalten. Ein weiteres Beispiel dafür ist der Flaschenzug; hier wird die Zugkraft mit dem Weg (wir ziehen entsprechend lange am Seil) vergrößert.



Ein Schaffner in der Straßenbahn liegt während der Fahrt ständig im Kampf mit der physikalischen Trägheit. Er muß nicht nur die Beschleunigung durch Neigen des Körpers nach vorn und die Verzögerung durch die entgegengesetzte Bewegung ausgleichen, sondern er ist in den Kurven auch noch der Fliehkraft ausgeliefert, die ihn zur Seite zieht. Dem stehenden Fahrgast geht es nicht anders. Dazu eine Frage: Fällt er beim Halten des Wagens (wenn er nicht aufpaßt) nach vorn oder nach hinten? Vorsicht — bitte erst prüfen! Ganz so einfach, wie mancher vielleicht denkt, ist die Sache nicht. Man macht solche Versuche am besten in Eisenbahn-Personenzügen. Sehr gut läßt sich die Trägheit auch an einem Pendel beobachten, das man im Abteil aufhängt; dabei ist es besonders reizvoll, sich die Gesichter der Mitreisenden anzusehen! Erzählen wir aber bitte nicht, wir



So zeichnet der Seismograph Erderschütterungen auf

pendelten aus, ob der Zug fahrplanmäßig einträte oder nicht. Nachher glaubt's doch einer! Wenn wir die Bewegungen unseres Pendels auf irgendeine schreibende Einrichtung übertragen, dann hätten wir einen *Beschleunigungsschreiber*. In den Eisenbahn-Meßwagen sind unter anderem Meßgeräte vorhanden, die nach diesem Prinzip arbeiten.

Jedes Erdbeben und jede starke Explosion im Erdinnern (beispielsweise durch Atomkernreaktion) verursacht eine oder mehrere Druckwellen, die sich nach allen Richtungen fortsetzen. Ordnet man eine träge Masse federnd an, so daß sie sich ziemlich frei bewegen kann, so wird sie ihre Lage zum ruhigen Erdboden nicht verändern. Zieht man unter der Masse einen Papierstreifen entlang, so wird ein an der Masse befestigter Schreibstift eine gerade Linie schreiben. Fängt die Erde an zu wackeln oder zu zittern, so bewegt sich das Papier mit. Die träge Masse bleibt aber an ihrer alten Stelle – und der Stift zeichnet jetzt die Erdschwingungen genau auf, auch sehr schwache. Das ist die Wirkungsweise des – im tiefen Keller aufgestellten – *Erdbebenmessers* (Seismographen).

Bei Kraftmaschinen mit Kolben und Zylindern tritt die Kraft mit regelmäßigen Unterbrechungen auf. Das *Schwungrad* überwindet dank der Trägheit seiner entsprechend großen Masse die „toten Punkte“ im Kurbelgetriebe; die Kraft wird nun gleichmäßig geliefert, weil das Schwungrad sie ausgleichend speichert und abgibt.

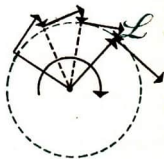
Fliehkraft, Kettenkarussell und Todeskurve

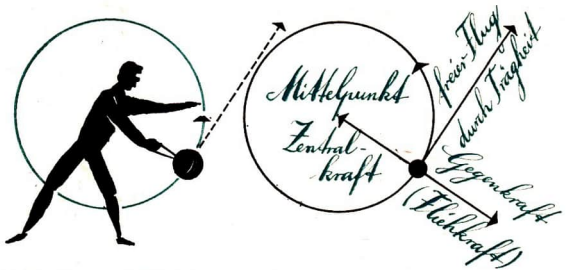
Jeder von uns hat schon einen Stein, eine Kugel oder eine andere Masse an einem Seil oder in einer Schleuder im Kreise herumgeschleudert; Schleuderballspieler und Hammerwerfer wissen damit besonders gut Bescheid. Man spürt die Kraft ganz deutlich, mit der die Hand die Masse auf ihre Kreisbahn zwingt. Wir wissen: Ist die Masse erst einmal in Bewegung, so muß sie nach dem Grundgesetz der Mechanik dank ihrer Trägheit geradlinig (in unserem Fall tangential vom Kreise fort) weiterfliegen. Das kann sie aber nicht, weil sie am Seil angebunden ist.

Wir lernen neue Kräfte kennen

Die Trägheit zerzt am Seil, spannt es, weckt die Molekularkräfte, die das Seil zusammenhalten. Wir merken diese Vorgänge sofort als Zug in unserer Hand. Die Hand wirkt dem Zug entgegen und zieht die Masse zu sich als dem Mittelpunkt (Zentrum der Kreisbewegung). Diese Kraft hat verschiedene Namen erhalten. Am anschaulichsten ist *Ziehkraft*; man nennt sie auch Mittelpunkts-, Zentral- oder Radialkraft (weil sie längs des Radius zum Mittelpunkt des Kreises wirkt). Vom lateinischen „*pétere*“ = anstreben bildete man „*Zentripetalkraft*“ (das hat nichts mit Pedal zu tun!). Ohne die Ziehkraft ist keine Kreisbewegung, ja überhaupt keine krummlinige Bewegung möglich. Sie muß dauernd gegen die Trägheit der bewegten Masse ankämpfen, die diese Masse in einer geradlinigen Bahn halten will. Die Hand empfindet diesen Trägheitswiderstand als eine Kraft, mit der die Masse vom Mittelpunkt zu fliehen sucht.

Der große Physiker Christian Huygens (1629 bis 1695), der sich mit dieser Kraft viel beschäftigt und auch über sie geschrieben hat, nennt sie daher *Zentrifugalkraft* – vom lateinischen *fugare* = fliehen. Wir sagen heute besser *Fliehkraft*. Sie wirkt wie eine „Gegenkraft“ zur Ziehkraft, weil sie gleich groß, aber entgegengesetzt ist.





Kräfteschema beim Schleuderball

Wenn wir in dunkler Nacht im Zuge fahren, können wir nicht sehen, daß wir in eine Kurve fahren; aber wir spüren die gekrümmte Bewegung dadurch, daß wir zur Seite gedrückt werden. Der Physiker sagt: „Hier greift eine Kraft an mir an. Da ich nichts von einer Kurve weiß, komme ich nicht auf den Gedanken, daß die Trägheit die Ursache ist; da mich die Kraft aus dem Wagen schleudern, mich gewissermaßen von meinem Platz fliehen lassen will, kann ich sie Fliehkraft nennen. Sobald ich an die Wagenwand komme, geht es nicht weiter. Die Wand übt eine gleich große Gegenkraft aus, die mich wieder nach innen drückt.“

Dem Nichtphysiker mögen solche Gedanken etwas spitzfindig vorkommen; aber die Wissenschaft muß auf strenge Logik halten. Im praktischen Leben spricht man unbeschwert immer von Fliehkraft (oder Zentrifugalkraft), wenn eine Masse bei kreisförmiger oder gekrümmter Bahn nach außen gedrückt wird.

Im Karussell wissen wir, daß wir eine kreisförmige Bahn fahren, und genießen die Fliehkraft – und wir freuen uns, daß die Schwerkraft, die Massenanziehung unserer alten Erde, die Fliehkraft in uns so weit übertrifft, daß wir auf dem Boden bleiben. Manchmal dürfte die Erdanziehung ja gern etwas weniger stark sein – wenn wir beispielsweise gerade die Treppe hinunterfallen; aber sie verhindert doch, daß wir in den Weltraum fliegen (daß das tangential vor sich ginge – wie bei den Funken an der Schleifscheibe –, wäre kein Trost). Wir bewegen uns – gemeinsam mit der Erdoberfläche – immerhin mit der etwa zwanzigfachen Geschwindigkeit eines Kraftwagens auf freier Strecke.

Das ist so: In 24 Stunden dreht sich die Erde einmal um sich selbst. Dabei legen wir auf dem Äquator eine 40000 km lange Strecke zurück, denn so lang etwa ist der Äquator; das sind 400 m je Sekunde. Wandern wir zu einem der Pole, so sinkt unsere Drehgeschwindigkeit; am Pol wird sie gleich Null. In diese beiden kühlen Gegenden müßte sich also die Menschheit zurückziehen, wenn die Massenanziehung der Erde nachließe . . . Aber dann fielen auch die Erde selber auseinander.

Die Größe der Fliehkraft ist abhängig von der umlaufenden Masse, von der Zahl der Umläufe in der Zeiteinheit (Drehzahl) und vom Radius, also der Länge der Schnur in unserem Beispiel. Je größer die Masse und je größer der Radius, um so größer ist die Fliehkraft. Die Drehzahl macht sich besonders bemerkbar; die Zentralkraft wächst mit dem Quadrat der Drehzahl. Die Erde brauchte sich nur 16mal so schnell wie jetzt zu drehen, dann würde der Mensch am Äquator kein Gewicht mehr haben und schweben. Die Naturgesetze sind erfreulicherweise dagegen.

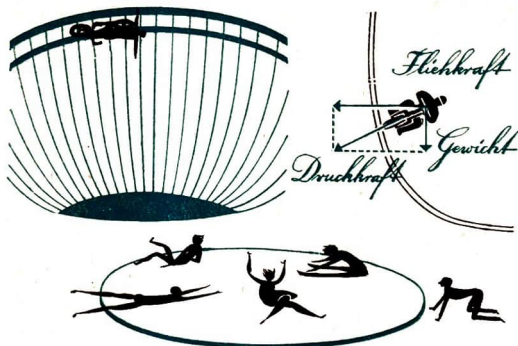
Das Gegenstück: Ein Satellit muß eine Geschwindigkeit von 7,9 km/s haben, wenn er die Erde umkreisen soll, ohne herunterzufallen. Bei dieser „ersten kosmischen Geschwindigkeit“ überwindet er, bedingt durch seine Trägheit, die Schwerkraft.

Fahren wir im Kraftwagen schnell durch eine Kurve, so drückt uns die Fliehkraft gegen die Wagentür; die Tür übt die Gegenkraft aus und drückt uns zurück.

Der Radfahrer, der Schlittschuhläufer, der Schnellläufer – jeder bewegt sich in der Kurve zum Mittelpunkt hin, um die Fliehkraft auszugleichen. Die Eisenbahn hat in jeder Kurve eine überhöhte Schiene, ein schrägliegendes Gleis, damit der Zug seine Geschwindigkeit beibehalten kann. Die Schwerkraft wird als Gegenkraft zu Hilfe geholt.

Diese Gegenkraft (später mehr davon) ist etwas sehr Alltägliches. Wenn wir in einem Sessel sitzen (etwa dieses Buch lesend), dann üben wir auf die Federn der Polsterung eine Druckkraft aus: unser Körpergewicht, die Beine meist abgerechnet. Die Federn werden zusammengedrückt und üben eine gleich große Gegenkraft aus. Das Gleichgewicht ist hergestellt, und wir „schweben“ in einer bestimmten Höhe. Der Physiker sagt: „*actio = reactio*“, Kraft gleich Gegenkraft.

Unsere Kenntnisse von der Physik des Jahrmarktes sind – vor allem bei Karussell und Achterbahn – um die Fliehkraft erweitert worden. Wenn wir im Kreise oder in der Kurve fahren, dann merken wir sehr gut, daß uns die Fliehkraft radial, in Richtung des Radius vom Mittelpunkt fort, wegbefordern will. Der Fahrende beugt sich zum Mittelpunkt der Kreisbewegung hin, um die Fliehkraft auszugleichen. Von außen sieht das ganz anders aus, also für den, der auf festem Boden steht und sich das alles ruhevoll ansieht. Ein weiteres Beispiel für „angewandte Fliehkraft“ auf dem Jahrmarkt ist der „Todesfahrer“ – eine den Zuschauer unheimlich anmutende Angelegenheit. Da fährt ein Motorradfahrer im Kreise auf einer fast senkrechten Wand und fällt nicht herunter! Es sieht viel gefährlicher aus, als es tatsächlich ist. Grundsätzlich ist es nichts anderes, als wenn wir mit unverminderter Geschwindigkeit in eine überhöhte Kurve fahren. Die Überhöhung, stets an der Außenseite der Kurve, ist so stark, daß sie die Fliehkraft auffangen kann. Der Fahrer hat dabei das Gefühl, auf waagerechter Straße zu fahren. Rad und Fahrer üben auch wirklich ihre Druckkraft senkrecht auf die schräge Fahrbahn aus. Die Pfeile im Bild zeigen, wie einfach und geradezu listig der Physiker aus mehreren zusammengesetzten (gleichzeitig auf einen Punkt wirkenden) Kräften die daraus sich bildende Gesamtkraft entstehen läßt, die er „Resultierende“ nennt (weil



Trägheit auf dem Jahrmarkt: Todesfahrer und Teufelsrad

sie das Resultat ist). Richtung und Größe von Gewicht und Fliehkraft sind bekannt, denn sie können gemessen werden; wir können beispielsweise beim Kurvenfahren einen Druckkraftmesser zwischen uns und die Wagenwand legen und die Größe der Fliehkraft ablesen. Das Gewicht wirkt stets senkrecht – zum Erdmittelpunkt.

Nun ergänzt der Physiker die zwei bekannten Kräfte durch Einfügen der zwei Parallelen ganz einfach zu einem Parallelogramm, das durchaus nicht immer ein Rechteck sein muß. Dann zieht er vom Schnittpunkt der gegebenen Kräfte aus die Diagonale – und schon hat er die Resultierende; sie gibt Richtung und Größe der einen *tatsächlichen Kraft* an. Dieses geniale Verfahren nennt man das *Parallelogramm der Kräfte*. Das macht die Zeichnung deutlich: Die Fliehkraft stört den Fahrer nicht mehr; er empfindet sie nicht, weil sie durch das anders gelagerte Gewicht ausgeglichen wird. Das Parallelogramm der Kräfte spielt in der Technik eine große Rolle. Stellt man die Kräfte in Richtung und Größe verhältnismäßig dar, kann man die Resultierende in Größe und Richtung zeichnerisch ermitteln.

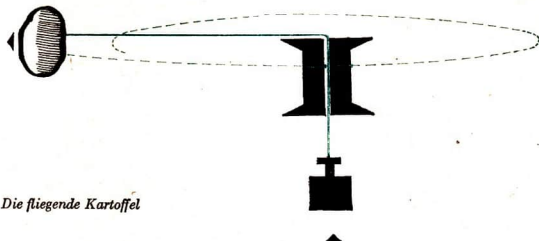
Es kommt auf den Standpunkt an

Ein letztes Beispiel vom Jahrmarkt zeigt uns besonders deutlich, daß es im Leben immer auf den Standpunkt ankommt: das „Teufelsrad“. Das ist eine große, leicht kegelförmige Scheibe mit erhöhtem, gepolstertem Rand. In der Pause klettern die Wagemutigen bis zum Mittelpunkt, und

dann geht's los! Das Rad dreht sich immer schneller, einer nach dem anderen rutscht infolge der steigenden Fliehkraft zur Freude der Zuschauer an den Rand des Teufelsrades – radial.

Ja, radial – mit Fliehkraft – vom Mittelpunkt der Scheibe aus, nicht aber vom Zuschauer her gesehen. Wenn zufällig kein Teufelsrad in der Nähe ist, können wir uns das durch ein Gedankenexperiment erklären. Wir sitzen (in Gedanken) in der Mitte des Rades und drehen uns mit. Jetzt lassen wir einen Gegenstand von uns fortgleiten. Er rutscht vor unseren Augen auf dem kürzesten Wege von uns, dem Mittelpunkt, zum Rande der Scheibe, also radial (auf einem gedachten Radius). Flöge er über die Scheibe hinaus, so behielte er für uns die Richtung bei; die Reibung und die Wirkung der Erddrehung lassen wir bei alledem aus dem Spiel. Und wie sieht der Zuschauer draußen den ganzen Vorgang? Für ihn bewegt sich der Gegenstand tangential nach außen, und der Zuschauer, der die Trägheitskraft kennt, findet das auch vollkommen richtig. Es kommt tatsächlich auf den Standpunkt an! Eine Fliege, die auf einem Flugzeugpropeller während des Fluges von der Achse bis an das Ende krabbelt, ist überzeugt, einen geraden Weg auf einer Ebene zurückzulegen. Sie hat von ihrem Standpunkt aus recht. Der Flugzeugführer in seiner Kanzel hinter dem Propeller beobachtet die krabbelnde Fliege und findet, daß sie einen Weg in Form einer Spirale zurücklegt, und zwar einer ebenen Spirale (auf einer Fläche). Ein Zuschauer auf der Erde sieht, wie die Fliege eine Spirale im Raum zurücklegt, weil sich im Verhältnis zu ihm auch das Flugzeug bewegt.

Mit diesen Überlegungen sind wir ein wenig in das nicht einfache Gebiet der Relativität geraten. Wir wollen das nicht weiterverfolgen, sondern uns nur zum Schluß einer bekannten Erscheinung erinnern: Wir sitzen auf einem Bahnhof im haltenden Zug und warten auf die Abfahrt. Auf dem Nebengleis steht ein anderer Zug. Plötzlich sehen wir, wie sich etwas bewegt – unser Blick gleitet am Nachbarzug entlang nach vorn, in unsere Fahrtrichtung. Wir fahren also, stellen wir fest. Leider war der Wunsch der Vater dieser Folgerung. Nicht wir fahren, sondern der Nachbarzug; der fährt in der Gegenrichtung aus dem Bahnhof. Erst ein Blick durch das gegenüberliegende Fenster überzeugt uns, daß unser Zug noch stillsteht,



Die fliegende Kartoffel

und allmählich vermissen wir auch die bei wachsender Geschwindigkeit auftretenden Geräusche und Stöße. Wir stehen still – relativ zum Bahnhof; wir sind in Bewegung – relativ zum fahrenden Nachbarzug. Und nun zu unseren Versuchen!

Die fliegende Kartoffel

Es müssen nicht unbedingt zwei Kartoffeln sein: Kugeln, Steine und andere Massen tun es auch. Wir ziehen durch eine Garnrolle oder ein Stück Rohr mit glatter Stirnfläche (bei Glasrohr: rund gegläht) einen Bindfaden von 60 bis 80 cm Länge. An dessen Enden wird je eine Masse angebunden. Die eine Masse lassen wir lose nach unten hängen; die andere schleudern wir, Garnrolle oder Rohr fest in der Hand haltend, im Kreise herum. Die herabhängende Masse wird sehr bald durch die Fliehkraft hochgezogen, und es zeigt sich, daß wir dort eine größere Masse anbringen müssen, um die Ziehkraft, das Gewicht der hängenden Masse, zu vergrößern. Wenn man an Stelle einer hängenden Masse einen Zugkraftmesser einbaut, kann man die starke Zunahme von Ziehkraft und Fliehkraft bei steigender Drehzahl sehr gut beobachten; man muß dafür sorgen, daß sich der Zugkraftmesser mitdrehen kann, am einfachsten durch einen festen, dünnen Bindfaden (zwischen Fußboden und Zugkraftmesser), der sich stark verdrillen läßt und nach jedem Versuch „entdrillt“ wird. Die Ziehkraft wird vom Mittelpunkt des Drehkreises aus radial gerechnet, auch wenn hängende Masse oder Zugkraftmesser nach unten wirken; hier ist nur die Wirkungslinie umgelenkt und verlängert worden.

Experimente mit der Schwungmaschine

Der manchmal für diese Versuche empfohlene Plattenspieler genügt nach unserer Erfahrung nicht – auch nicht bei 78 Umdrehungen je Minute. Wir brauchen meist eine höhere Drehzahl; außerdem ist es gut, wenn man sie von Null bis zum Höchstwert regeln kann. Glücklicherweise ist es nicht schwierig, eine Schwungmaschine selbst zu bauen. Die Hauptsache ist eine runde Holzscheibe von etwa 20 cm Durchmesser, die in rasche Umdrehungen versetzt werden kann. Wer eine mechanische (mit Kegelradübertragung und seitlichem Antrieb) oder elektrische Bohrmaschine hat, befestigt genau im Mittelpunkt der Scheibe eine Metallachse von 4 bis 5 mm Durchmesser, etwa 2 cm hervorstehend. Die Bohrmaschine wird mit Hilfe von Schraubzwingen, Riemen oder anderen Mitteln am Tisch senkrecht befestigt; die Scheibe wird eingespannt. Bei elektrischen Bohrmaschinen brauchen wir einen regelbaren Widerstand, mit dem wir die Drehzahl regeln können. Rings um die Holzscheibe klemmen wir noch einen nach oben stehenden Pappiring; er soll verhindern, daß Gegenstände unnötig fortgeschleudert werden. Er kann nach Belieben entfernt werden. Die Schwungmaschine ist nun betriebsbereit. Hat man keine Bohrmaschine, so lagert man die Scheibe drehbar; unterhalb wird ein kleines Transmissionsrad mit etwa







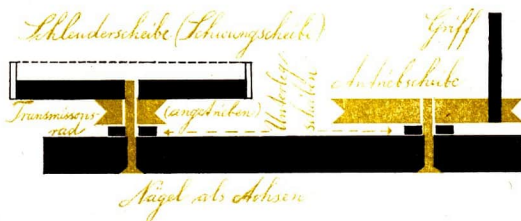


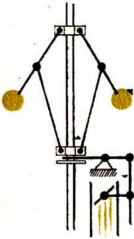
Der Jahrmarkt gibt uns immer wieder die Möglichkeit, Physik auf reizvolle Art selbst zu erleben.

2 cm Durchmesser befestigt. Die untenstehende Abbildung zeigt die Anordnung auf der Grundplatte im Schnitt. Das Grundbrett kann etwa 30 cm mal 50 cm groß sein. Zwei im Grundbrett festsitzende Rundnägel bilden die Achsen für Schleuderscheibe mit Transmissionsrad und für die Antriebs-scheibe (Antriebsrad) mit dem Handgriff. Beide Räder lassen sich aus Laubsägeholz sägen; die umlaufende Nut kann man dadurch erzielen, daß man eine etwas kleinere Scheibe zwischen zwei größere klebt (Faserrichtungen senkrecht zueinander!). Auch die Schleuderscheibe kann aus Laubsägeholz (Sperrholz) hergestellt werden. Unter die beiden Räder legen wir je eine Unterlegscheibe aus Metall, damit die Reibung zwischen Grundbrett und Rädern verringert wird. Die Räder müssen leicht auf den Achsen laufen. Zum Übertragen unserer Drehbewegung eignet sich am besten Gummiband. Offengeblieben ist die Frage, wie groß der Durchmesser der Antriebs-scheibe sein soll. Das gibt ein wenig Rechnerei: Die Drehzahlen beider Scheiben verhalten sich umgekehrt wie ihre Durchmesser. Mache ich den Durchmesser der Antriebsscheibe zehnmal so groß wie den des angetriebenen Rades unter der Schleuderscheibe, so verzehnfache ich die Zahl meiner Umdrehungen an der Antriebsscheibe. 50 Umdrehungen je Minute können wir bequem gleichmäßig (das ist sehr wichtig!) schaffen; dann dreht sich die Schleuderscheibe 500mal je Minute. Das dürfte genügen. Man kann auch den Durchmesser des angetriebenen Transmissionsrades etwas verkleinern – aber dann wird die Berührungsfläche zwischen Rad und Gummiband vielleicht zu klein, und das Band rutscht. Im allgemeinen genügt es, wenn man den 7- bis 8fachen Durchmesser des kleinen Rades für die Antriebsscheibe nimmt. Maßgebend ist dabei stets der kleinere, innere Durchmesser in der Nut. Im übrigen ist der schöpferischen Phantasie des Lesers auch hier keine Grenze gesetzt. Kleine elektrische Antriebsmotoren und Metallbaukästen lassen sich ausgezeichnet verwenden. Wir beginnen nun mit den eigentlichen Versuchen.

Daß Gegenstände, auf die laufende Schleuderscheibe (bei diesem Versuch auch eines Plattenspielers) gelegt, hinuntergeschleudert werden, ist bekannt. Es ist aber reizvoll zu beobachten, wie unterschiedlich dies mit Din-

Selbstgebaute Schwingmaschine





gen verschiedener Masse und bei anderen Geschwindigkeiten der Scheibe und verschiedenen Abständen vom Mittelpunkt geschieht!

Wir füllen eine runde, möglichst niedrige und breite Glasflasche zu einem Viertel mit Wasser und färben dieses mit Kaliumpermanganat (KMnO_4) oder mit Tinte sehr dunkel. Auf das Wasser gießen wir ebensoviel Petroleum oder ein anderes helles Öl. Die Flasche ist nun zur Hälfte gefüllt; das Öl schwimmt auf dem Wasser, weil es die geringere Dichte hat und sich mit Wasser nicht mischt. Wir stellen die geschlossene Flasche mitten auf die Schwingscheibe (befestigen sie vielleicht mit etwas Kitt) und drehen zunächst langsam, damit die Flüssigkeit besser mitgenommen wird, dann allmählich schneller. Wenn sich die Flüssigkeiten mitdrehen, sammelt sich das schwere Wasser an der Flaschenwand; das Öl liegt neben ihm – nach der Flaschenmitte zu. Das ist die Wirkungsweise aller Zentrifugen, Schleudern und Kreiselpumpen; beim Milchscheidern sammelt sich die Sahne innen, die (schwerere) Magermilch außen. Bei der Wäsche-Trockenschleuder wird das Wasser aus der nassen Wäsche durch die Löcher in der Trommelwand hinausgedrückt; von hier fließt es nach unten ab.

Ist die Tatsache, daß unsere Erde am Äquator nach außen gewölbt und an den Polen abgeplattet ist, auch auf dieses Prinzip zurückzuführen?

Wir binden an einer Stange, etwa 20 cm lang, an zwei 10 cm langen Fäden je eine Metallkugel an. Die Stange stecken wir in eine recht schwere Garnrolle, und diese wird genau auf die Mitte der Schwingscheibe gestellt. Beim Umlaufen heben sich die Kugeln entsprechend der Drehzahl. Verschieden schwere Kugeln verhalten sich ungleich. Das ist die Wirkungsweise der Fliehkraftregler (Zentrifugalregler). Wird die Drehzahl einer Dampfmaschine zu groß, dann heben sich die umlaufenden Massen entsprechend. Diese Bewegung überträgt ein Gestänge auf eine Drosselklappe in der Dampfzufuhr. Die Zufuhr wird gedrosselt, die Drehzahl der Maschine geht zurück, und die umlaufenden Kugeln am Regler sinken wieder ein Stück herab.

Wir können unsere Stange auch zu einem kleinen Versuch verwenden, der die Frage, warum unsere Erde an den Polen abgeplattet ist, beantwortet. Aus einer Uhrfeder (oder ähnlichem, sehr elastischem Stahlband) wird ein Ring gebildet, dessen Durchmesser so groß ist, wie die Stange lang ist. Unten muß der durchbohrte Ring am Fuß der Stange festsitzen; oben muß er frei an der Stange entlanggleiten können. Wie verhält sich der Ring bei schneller Umdrehung?

Wir stellen ein etwa zur Hälfte mit gefärbtem Wasser gefülltes Glas auf die Mitte der Schwingscheibe und lassen diese anlaufen (gegebenenfalls das Glas wieder mit etwas Plastilin oder ähnlichem befestigen!). Wir beobachten, daß das Wasser an den Wänden hochsteigt (Vorsicht, daß es nicht überläuft!). Es möchte sich gern ganz gleichmäßig an die Glaswand anschmiegen; aber die Erdanziehung läßt das nicht zu. Aus Zentralkraft und Erdanziehung bildet sich eine Fläche heraus, die man als „Rotations-Paraboloid“ bezeichnet; sie entsteht, wenn man eine Parabel um ihre Symmetrie-Achse dreht. Ein Querschnitt durch unser kletterndes Wasser ergäbe also eine Parabel. Man kann auf der schrägen Wasserfläche ein Schiffchen

schwimmen lassen, aus einem Holzklötzchen als Rumpf, einem kleinen Nagel als Mast und einem Stück Blech unten als Kiel. Das Schiffchen klettert allmählich nach oben und hält sich da ähnlich wie der „Todesfahrer“ an seiner senkrechten Wand.

Nimmt man statt des Wassers flüssiges Paraffin, Stearin oder Wachs im angewärmten Glas, so steigt es ebenfalls und bildet eine paraboloidische Fläche. Läßt man die Schleudermaschine nun so lange mit gleichbleibender Geschwindigkeit laufen, bis die Masse erstarrt ist, dann kann man den so entstandenen mathematischen Körper aus dem (notfalls von außen etwas angewärmten) Glas herauslösen.

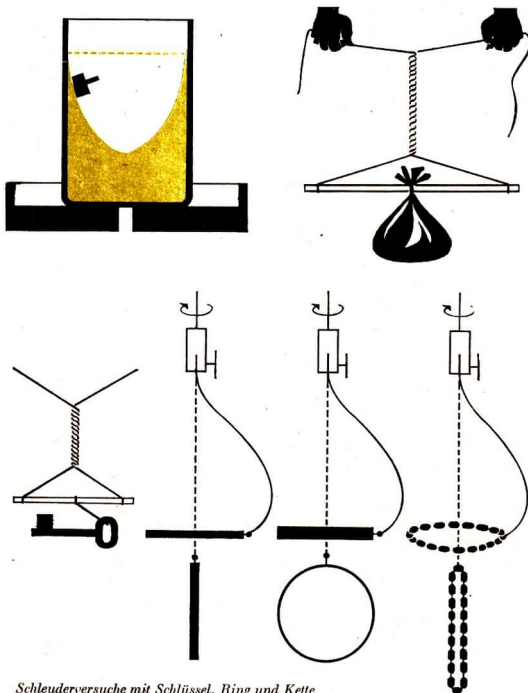
Die Technik nutzt diese Kraftwirkung beim *Schleuderguß* aus; man stellt auf diese Weise nahtlose Rohre und Buchsen her. Das flüssige Metall wird in eine waagrecht gelagerte, schnell umlaufende Trommel gegossen. Hier wird es an die (meist wassergekühlte) Trommelwand geschleudert und erstarrt schnell in der gewünschten Form.

Auch die *Schleudergrube* gehört hierher. Sie ist eine runde, tiefe Grube in der Erde, mit dicken Bohlen ausgekleidet. In ihr werden schwere umlaufende Maschinen, wie Turbinen und Motoren, auf ihre Festigkeit (Belastbarkeit) geprüft. Man läßt sie auch mit Überdrehzahl laufen und beobachtet ihr mechanisches Verhalten. Fliegt eine Maschine auseinander, so werden die Teile von der Bohlenwand aufgehalten; sie können keinen Schaden anrichten. Den Konstrukteuren umlaufender Maschinen macht die Fliehkraft viel Kopfzerbrechen. Die bewegten Teile streben mit erheblicher Kraft vom Drehpunkt (der Achse) fort, müssen aber – wie etwa die Wicklungen des Läufers eines Elektromotors oder eines Stromerzeugers – genau auf ihrem Platz gehalten werden. Beliebig kräftige Verstärkungen kann man da nicht überall anbringen, teils um die Masse (und damit die Fliehkraft) nicht noch mehr zu vergrößern, teils weil der Platz nicht ausreicht. Besonders stark werden Turbinenschaufeln beansprucht; sie müssen außer der Fliehkraft große Drücke und (bei Gas- und Dampfturbinen) hohe Temperaturen aushalten. Bei solchen Teilen spielt daher neben der Konstruktion auch der Werkstoff mit seinen Eigenschaften in besonderen Legierungen eine große Rolle.

Wer keine Schleudermaschine hat...

Wer keine Schleudermaschine hat, der macht die Fliehkraftversuche mit einer stark verdrehten doppelten Schnur. Ein Stab wird an zwei Bindfäden – jeder etwa 40 cm lang – aufgehängt und so lange gedreht, bis beide Fäden ganz miteinander verdreht sind. In der Mitte des Holzstabes hängt ein Plastbeutel, zu einem Viertel mit gefärbtem Wasser, zu einem zweiten Viertel mit Petroleum gefüllt. Lassen wir den Stab los, so drehen sich die Fäden wieder zurück, und wir können die gleichen Beobachtungen wie auf der Schleudermaschine machen. In entsprechender Weise wird ein Becherglas (mit nach außen gewölbtem Rand) am Stab angebracht und in schnelle Drehung versetzt. Und wenn das Glas schon einmal so schön fest

angebunden ist, können wir anschließend den klassischen Schleuderversuch machen: Wir fassen die freien Schnurenden fest an und schleudern das Glas (das jetzt ganz voll Wasser sein darf) im senkrechten Kreis herum. Das Wasser fließt nicht aus, auch nicht, wenn das Glas ganz oben kopfsteht. Schwindelfreie Experimentatoren können das Glas auch, sich selber mitdrehend, im waagerechten Kreis schleudern. Durch Ändern der Schnurlänge kann man verschiedene Beobachtungen machen; die Fliehkraft vergrößert sich ja mit dem Radius des Kreises. Wer im übrigen nicht gern mit einem Glas arbeitet, mag eine Konservendose nehmen. Die parabolische Oberfläche des Wassers kann man auch dadurch zustande bringen, daß Wasser in einem Topf kräftig und gleichmäßig gerührt wird.



Schleuderversuche mit Schlüssel, Ring und Kette

Der schwebende Schlüssel

Unsere Versuchsanordnung von Seite 68 eignet sich auch für diesen Versuch. Wir hängen an den Drehstab zunächst eine ziemlich schwere Masse, etwa einen halben Ziegelstein; er soll mit Hilfe seiner Trägheit die Drehbewegung gleichmäßig machen. Der Stein muß genau in der Mitte hängen, so daß er sich ohne seitliche Schwingungen um seine (gedachte) senkrechte Achse drehen kann. Unten am Stein, wieder genau in der Mitte, wird ein kleiner Schlüssel angehängt. Er stellt sich bei wachsender Drehzahl waagrecht ein — ein verblüffender Anblick! Der Grund ist folgender: Ring und Bart des Schlüssels sind die schwersten Teile (die massenmäßig größten) des Schlüssels. Durch den nur nach einer Seite „wachsenden“ Bart hängt der Schlüssel sofort etwas schief. Er gerät ins Schleudern, und nun wirkt das Naturgesetz: Je größer die Masse, um so größer die Fliehkraft.

Die Ring- und Bartmassen wollen möglichst weit fort; zwischen den Kräften stellt sich in waagerechter Lage des Schlüssels das Gleichgewicht ein. Der Schlüssel dreht sich waagrecht um seine *freie Achse*.

Schwebende Scheibe und Kette

An Stelle des Schlüssels im vorherigen Versuch kann man einen Stab, eine Kreisscheibe (oder einen Ring) oder eine Kette anbringen. Alle diese Körper verhalten sich wie der Schlüssel. Sie schlingern erst ein wenig, Fliehkkräfte treten auf, der Haltefaden biegt sich birnenförmig seitlich fort, und der Körper legt sich waagrecht und dreht sich um seine freie Achse. Hier liegt ein Übergang zum Geheimnis der Kreiselbewegung vor — unser Schlüssel ist ein Kreisel!

Auch der Kreisel „lebt“ von der Trägheit

Wer hat nicht als Kind Kreisel gespielt und seinen Reifen bewegt? Was weiß das Kind von Impuls und Trägheit — es schlägt seinen Kreisel und Reifen mit Peitsche und Stab, erreicht darin eine oft beachtliche Geschicklichkeit und freut sich über die gleichmäßige und langdauernde Bewegung.

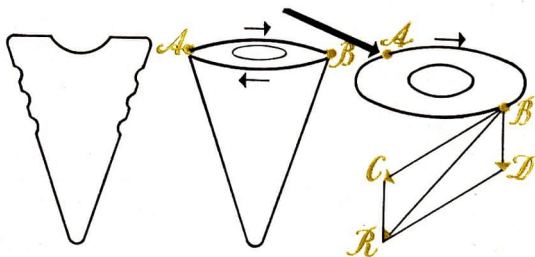
Der kluge Erwachsene weiß inzwischen längst, daß die allgegenwärtige Trägheit auch beim Kreisel wirkt. Zunächst muß der Kreisel aus seiner Ruhe in Bewegung gebracht werden: durch Energiezufuhr mit der Hand, bei technischen Anwendungen (Kreiselkompaß) mit einem Elektromotor. Dann muß laufend die feindliche Reibung überwunden werden — im Spiel mit der Peitsche oder dem Stock. Warum fällt denn der Kreisel nicht um? Wir nennen den Schlüssel im vorhergegangenen Versuch ebenso wie Kreisel und Reifen einen frei beweglichen Körper, auch wenn er in einem Punkt hängt oder steht. Er dreht sich um seine „freie“ Achse; sie heißt so, weil sie



frei von Lagern und meist sogar nur in unseren Gedanken vorhanden ist. Sie muß allerdings durch den Schwerpunkt des kreisenden Körpers gehen und ringsherum von gleich großer Masse umgeben sein – die Trägheitskräfte beim Drehen müssen, mit anderen Worten, bei allen gegenüberliegenden Punkten im Gleichgewicht sein. Ganz einfach gesagt: Das Ding muß schön rund sein! Jeder Längsschnitt durch den Kreisel und seine Achse gibt eine symmetrische (auf beiden Seiten der Achse gleiche, aber seitenverkehrte) Figur.

Wenn wir dann eine richtige Achse, unten zugespitzt, durch die Mitte stecken und den Körper zwischen Daumen und Zeigefinger „andrehen“, dann ist der Kreisel fertig und in Betrieb. Die Schwerkraft sucht den etwas schräggestellten Kreisel umzukippen; die Trägheit wehrt sich dagegen. Aus beiden Kräften ergibt sich wieder eine Resultierende. Das wirkt sich beim laufenden Kreisel so aus, daß die freie Achse mit ihrem oberen Endpunkt einen Kreis und mit ihrer ganzen Länge einen Kegelmantel beschreibt. Diese Erscheinung nennt man *Präzession* (vom lateinischen *praecedere* = vorrücken). Die Achse versucht immer, seitlich vor einer angreifenden Kraft auszuweichen. Das Einwirken einer zweiten Kraft auf einen Kreisel kann man sich leicht klarmachen. Wir nehmen einen gewöhnlichen Spielzeug-Kreisel (einer ohne Musik genügt) und versetzen ihn in schnelle Drehung. Nun denken wir uns einen Punkt A, gegen den drücken wir kurz nach rechts. Der Punkt B – genau gegenüber – wird sich abwärts bewegen, während A zunächst nach oben geht.

In der untenstehenden Abbildung ist B ein Masseteilchen, das sich infolge seiner Trägheit am liebsten tangential in Richtung C bewegen möchte; es kann aber nicht so, wie es möchte. Jetzt kommt der Stoß nach abwärts, nach D. Das ist eine zusätzliche Bewegung; und da man Bewegungen ebenso schön wie Kräfte in einem Parallelogramm zusammensetzen kann, erhalten wir die neue tatsächliche Bewegungsrichtung nach R – durch die Diagonale des Rechtecks, die Resultierende. Das Masseteilchen B hat also eine neue Eigenbewegung bekommen. Wir müssen aber jetzt bedenken,



Kräfte am Kreisel

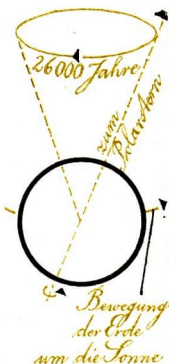
daß die alte Eigenbewegung (nach C) bei dem sich rasch drehenden Kreisel sehr groß war im Verhältnis zu der kleinen zusätzlichen Abwärtsbewegung D, die wir verursacht haben; die Resultierende BR unterscheidet sich von der ursprünglichen Eigenbewegung BC nur sehr wenig. Der Kreisel ändert seine Bewegung nur sehr gering, und uns kommt es so vor, als wehre er sich gegen das Umkippen. Dieser Eindruck ist um so stärker, je größer die Masse des Kreisels ist und je schneller er sich dreht. Wenn die störenden Kräfte freilich groß genug sind, dann wird die Sache wacklig! Unserer alten Erde geht es so, obwohl sie sich sehr schnell dreht und ihre Masse wahrlich nicht klein ist; ihre Achse beschreibt ebenfalls einen Kegelmantel. Die Trägheit, die die Erde zusammen mit einer schrägliegenden Achse bei ihrer Geburt mitbekommen hat, liegt im Kampf mit den (freilich sehr großen) Anziehungskräften von Sonne und Mond. Aber wir merken davon nichts; es dauert fast 26000 Jahre, bis die Erdachse einen Umlauf gemacht hat. „Platonisches Jahr“ heißt dieser lange Zeitraum. Jemand, der so lange lebt, würde die Präzession daran merken, daß die Verlängerung der Erdachse allmählich nicht mehr, wie heute, zum Polarnoten führt – erst nach Ablauf des platonischen Jahres wäre dies wieder der Fall; eine etwas zeitraubende Beobachtung! Unser Kreisel hat nur eine einzige freie Achse; um sie dreht er sich. Wie viele freie Achsen kann eine Kugel haben? Die Kugel soll ganz aus einheitlichem Stoff bestehen, also „homogen“ sein.

Eine besonders eindrucksvolle Anwendung der Kreisel-Trägheit ist der schwere Schiffskreisel, der durch seine Trägheitskraft ein großes Schiff bei Seegang weitgehend vor dem Schlingern und die Passagiere vor der Seekrankheit bewahrt. Freilich muß die Masse des Kreisels hier sehr groß sein – beispielsweise 200 t (200000 kg) bei etwa 4 m Durchmesser des Kreisels; außerdem sind mindestens zwei solcher Kreiselle nötig, einer vorn und einer hinten im Schiff. Das ist schon etwas Besonderes. Ganz alltäglich dagegen und dadurch schon wieder meist unbemerkt ist der Kreisel im Verkehr: als Rad am Kraftwagen, am Motorrad, am Fahrrad. Beim Pferdewagen und häuslichen Handwagen gelten unsere Erkenntnisse zwar auch, aber diese Räder drehen sich zu langsam, als daß man die Trägheit spüren könnte.

Ganz anders an den schnellen Fahrzeugen! Das (verbotene) Freihandfahren auf dem Rade ist jetzt verständlich. Jedes sich schnell drehende Rad (die Drehzahl spielt eine große Rolle) will mit seiner Achse seine Richtung beibehalten, jeder seitlichen Kraft ausweichen. Im Zirkus werden gelegentlich erstaunliche Leistungen auf Fahrrädern und Motorrädern gezeigt; stets ist die Trägheit – Kreiselwirkung – Voraussetzung.

Und da wir gerade im Zirkus sind: Wer hat einmal gesehen, wie ein Clown aus mehreren Metern Entfernung seinem Kollegen einen hohen Hut auf den Kopf wirft? Mit etwas Übung durchschauen wir den physikalisch begründeten Trick: Der Hut wird in Drehungen um seine freie Achse versetzt; dadurch behält er seine aufrechte Lage und gelangt richtig auf den Kopf des Partners. Mancher hat auf diese Weise im wahren Sinne des Wortes „den Bogen heraus“, wenn er zur Verblüffung der Anwesenden seinen Hut (vor allem einen festen, ziemlich runden Strohhut, die „Butter-

*Die freie Achse
unserer Erde
beschreibt einen
Kegelmantel*





Grundversuch zur
Pirouette und Kreisel
mit Präzession

blume“) oder seine Mütze mit elegantem Schwung auf den entfernten Kleiderhaken befördert.

Beim Jo-Jo-Spiel ist ein kleiner Doppelkegel an einem Ende eines Fadens befestigt; man läßt den Doppelkegel am Faden auf und ab laufen. Der Faden ist zunächst aufgewickelt; der Körper rollt nach unten ab und bekommt dadurch eine ziemlich große Geschwindigkeit. Dank der Trägheit dreht er sich weiter und rollt sich am Faden wieder hoch – durch die Reibungsverluste freilich nicht bis zur alten Höhe. Man gleicht diesen Verlust dadurch aus, daß man dem ganzen „System“ immer wieder einen neuen Schwung gibt.

Beim Diabolospiel wird ein etwas größerer Doppelkegel mit einer Schnur in schnelle Umdrehung versetzt; die Drehachse wehrt sich jetzt gegen jede Veränderung ihrer Lage, und das „Diabolo“ kann leicht mit der Schnur in die Höhe geworfen und wieder aufgefangen werden. Dabei muß die Drehzahl, die durch die Luftreibung absinkt, immer wieder erhöht werden; das ist das ganze Geheimnis. Jeder Jongleur arbeitet auf diese Weise, er hält seine Teller und sonstigen (stets runden!) Gegenstände meist mit Stäbchen auf der nötigen Drehzahl.

Diese physikalische Erscheinung wird sehr viel ausgenutzt, auch im Sport beispielsweise. Man gibt einem Ball, einer Kugel oder einem Seil (Lasso) durch einen Schlag oder Stoß einen besonderen Drall (Drehimpuls); dadurch beeinflußt man den Lauf. Man nennt das Effet (französisch, ausgesprochen „effee“). Und fragen wir einmal eine Tänzerin oder einen Tänzer nach einer Pirouette! Auch die Eiskunstläufer wissen da Bescheid. Pirouette ist das französische Wort für Kreisel. Streckt der Kunstläufer seine Arme von sich, so sinkt seine Drehzahl; der Radius der kreisenden Masse ist größer geworden. Legt er die Arme wieder an, so dreht er sich sofort wieder so schnell wie vorher. Wir können das selber prüfen, wenn wir einen Drehstuhl haben. Den Zusammenhang zwischen Radius und Drehzahl merken wir schnell, wenn wir eine kleine Masse am Faden um unseren Zeigefinger kreisen und dabei den Faden sich um den Finger wickeln lassen.

Ein Kreisel ist schnell gebaut

Ein rundes Stückchen Pappe, ein zugespitztes Streichholz einen Zentimeter durch die Mitte hindurchgesteckt – und der Kreisel ist fertig und kann mit den Fingern angelassen werden. Er ist nicht so großartig und läuft auch nicht so lange wie die schweren Spielzeugkreisel aus Metall, die mit einer Wendel wie ein Drillbohrer „angelassen“ werden. Aber unser Kreisel läuft auch, und das ist die Hauptsache. Vermutlich zeigt er gleich eine deutliche Präzession. Das kommt daher, daß wir das Stück Pappe nicht rund genug geschnitten oder beim Durchstecken des Streichholzes nicht genau den Mittelpunkt der Kreisfläche getroffen haben; dadurch wirkt eine zusätzliche Kraft. Welche? Ganz recht: ein Überschuß an Schwerkraft auf einer Seite. Läuft der Kreisel aber ganz senkrecht, so können wir den Ausschlag zur Seite dadurch hervorrufen, daß wir einen gespannten Faden leicht oben an die Achse drücken.

Das „aufrichtige“ Ei

Wer hat noch das hartgekochte Ei von früheren Versuchen? Wer es aufgegessen hat, der kocht ein neues schön hart; es wird sich lohnen. Wir legen es auf einen glatten, möglichst großen Tisch flach hin und versetzen es (Übung hilft!) in sehr schnelle Drehung! Man kann den Versuch auch auf der Unterseite eines großen Tellers durchführen. Es dreht sich erst liegend, richtet sich dann aber nach wenigen Sekunden plötzlich – scheinbar der Schwerkraft trotzend – auf; ein verblüffender Anblick! In dieser senkrechten Stellung dreht es sich eine Weile, bis die Drehenergie durch die Reibung aufgezehrt wird. Warum? Beim Drehen im Liegen kann das Ei die freie Achse nicht finden, weil es da nicht symmetrisch, genauer: kein richtiger „Drehkörper“ ist. Also sucht es die freie Achse und findet sie beim Drehen um die Längsachse – in der Senkrechten. So folgerichtig wirken die Naturgesetze! Daß sich das Ei dabei gleich auf die Spitze stellt, wollen wir nicht verlangen; dafür ist Kolumbus zuständig.

Das „aufrichtige“ Ei und das gehorsame Fahr-Rad



Das gehorsame Fahrrad

Nehmen wir einmal aus unserem Fahrrad das Vorderrad heraus. Wir fassen die Achse fest mit beiden Händen an und lassen einen Helfer das Rad in sehr schnelle Drehungen versetzen. Dann merken wir den erheblichen Widerstand der Achse, wenn wir sie aus ihrer alten Lage wegdrehen wollen. Er ist erstaunlich groß! Gegen paralleles Verschieben hat die Achse dagegen nichts einzuwenden. Jetzt werden wir noch besser verstehen, warum man die schon erwähnten schweren Kreisel in Schiffe einbaut, um das Schlingern

zu verhindern; wir werden auch begreifen (das Wort kommt von „be“-greifen, anfassen), wieso der Kreisel im Kreiselkompaß die einmal eingestellte Nord-Süd-Richtung so sicher beibehält. Die Windrose bewegt sich unter ihm. Wir können aber noch einen Schritt weitergehen und das kreisende Rad an einem Faden aufhängen: Die Achse behält ihre waagerechte Lage, dem Naturgesetz des Kreisels folgend, bei.

Die böse und die gute Reibung

Zumeist steht die Reibung in einem recht schlechten Ruf. Der Konstrukteur, der starke Kräfte von einer Achse auf ein Lager – oder umgekehrt – übertragen soll, denkt mit Sorge an die Gegenkraft Reibung; er weiß: Sie wird nicht nur einen Teil der zu übertragenden Kraft aufzehren, sondern obendrein diesen Teil nicht vernichten (das läßt das Naturgesetz nicht zu), sondern in höchst unerwünschte Reibungswärme umwandeln.

Sorgsam überlegt er deshalb die technischen Gegenmaßnahmen: reibungsarme Lagerarten, wie Kugellager, werden gegebenenfalls benötigt, gute Schmierung ist erforderlich, bei der ein Ölfilm zwischen Achse und Lager entsteht, der beide Teile gar nicht erst zusammenkommen läßt. Auch an eine gute Ableitung der trotzdem entstehenden Reibungswärme muß der Konstrukteur denken. Seine Überlegungen sind für das künftige einwandfreie Funktionieren aller Teile entscheidend.

Es gibt keine Bewegung ohne Reibung, und jede Reibung ist Gegenkraft – sie setzt stets einen mehr oder weniger großen Teil der in eine Maschine gesteckten mechanischen Energie in Wärmeenergie und Schallenergie (die Straßenbahn quietscht in der Kurve!) um. Wir bekommen entsprechend weniger aus der Maschine wieder heraus, das heißt: Der Wirkungsgrad, dieses Verhältnis von herausgeholt zu hineingesteckter Energie, ist stets unter 1 oder unter 100%. Die Reibungsverluste sind nicht die einzige Quelle der Sorge. In Wärmekraftmaschinen geht durch unerwünschte Fortleitung und Abstrahlung von Wärme oft noch viel mehr verloren, beispielsweise bei Dampflokomotiven; der thermische Wirkungsgrad einer Schnellzuglokomotive liegt zwischen 9,5 und 11,5%.

Maschinen ohne mechanische Bewegungen haben keine Reibungsverluste; Beispiele sind die elektrischen Umspanner, die 90% und mehr Wirkungsgrad erreichen. Bei den Umspannern entsteht der Verlust durch unerwünschte Wirbelströme, durch Wärmeentwicklung in den Wicklungen und andere Ursachen.

Jahrhunderte hindurch haben Erfinder an einer Maschine gebastelt, die – einmal in Gang gesetzt – immer weiterlaufen und dabei sogar noch Arbeit verrichten sollte: am perpetuum mobile (lateinisch: „ständig in Bewegung“). Kluge Köpfe waren dabei, beispielsweise der italienische Naturforscher, Ingenieur und Künstler Leonardo da Vinci (1452 bis 1519). In Paris wurde noch 1750 ein hoher Geldpreis für die Erfindung dieser Traummaschine ausgesetzt! Alles das war möglich, weil das Naturgesetz von der Reibung noch nicht erkannt war.

Die Welt ohne Reibung

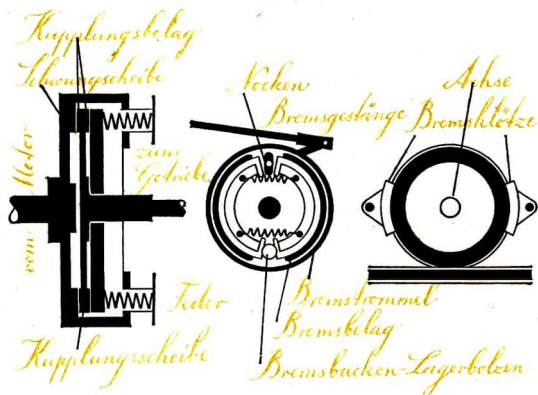
Gewiß, manches wäre ohne Reibung angenehmer. Die Maschinen würden leichter laufen, aus der Achterbahn auf dem Jahrmarkt könnte man ein Perpetuum mobile machen; man müßte dann nach langer Fahrt oben am Turm aussteigen, wo die Abwärtsfahrt (und wie wir wissen, die Umsetzung der Energie der Lage in die der Bewegung) beginnt. Warum wir nicht bequemer unten aussteigen? Das ginge nicht, denn man müßte bremsen, und (mechanisch) bremsen kann man nur mit Reibung! So wunderschön der Gedanke ist, nach anfänglichem Gasgeben (um die Trägheit zu überwinden und die Masse zu beschleunigen) mit dem Kraftwagen mit der erreichten Geschwindigkeit beliebig weit ohne weiteren Benzinverbrauch fahren zu können – so wenig schön ist die Vorstellung, daß man nur anhalten kann, indem man mit Höchstgeschwindigkeit gegen einen Baum oder eine Mauer fährt. So viele Bäume und Mauern gäbe es gar nicht! Und elastische Aufgangsvorrichtungen – ähnlich den Puffern bei der Eisenbahn – würden nur bewirken, daß der Wagen mit gleicher Geschwindigkeit nunmehr rückwärts fährt; noch peinlicher. Alles übrige, was geschieht, wenn niemand mehr bremsen könnte, kann sich jeder leicht selber ausmalen. Nicht ohne Grund sind die Verkehrsvorschriften auch in bezug auf die Bremsen so streng.

Die gute Reibung! Sie ist also doch zu etwas nützlich – zu viel mehr sogar, als mancher zunächst denkt. In unserer schreckensvollen Vorstellung von bremsenlosen Wagen ist ein Fehler. Wer hat ihn gemerkt? (Falls nicht: Schadet nichts; um so aufmerksamer weiterlesen!) Ohne Reibung kann nämlich überhaupt kein Wagen fahren – mit Ausnahme der Zahnradbahn; das ist des Rätsels Lösung. Wir kennen es alle, dieses Mahlen der Räder auf glatter Schiene oder in Eis und Schnee: Die Reibung zwischen Rad und Fahrbahn reicht nicht aus. Dann kommen die Schneeketten dran, und Sand wird gestreut. Der Verkehr stünde ohne Reibung also still. Kein Treibriemen übertrüge mehr Kraft, kein Knoten hielte. Aber es kommt noch schlimmer: Kein Mensch könnte mehr gehen! Nicht einmal Eiskunstläufer würden es schaffen, denn sie haben hin und wieder die Reibung zwischen Schlittschuh und Eis zum Kraftumlenken sehr nötig; die Eisfläche ist nach dem Lauf stark zerkratzt.

Auch an Seile geklammert könnten die Menschen sich nicht vorwärts bewegen, denn dazu gehört schon wieder die gute Reibung. Man könnte sich höchstens wie in der fahrenden Straßenbahn von einem Haltering zum anderen vorwärts ziehen, weil die herumgelegten Finger da nicht abrutschen können. Nägel würden aus der Wand fallen, Häuser einstürzen, weil beim Verbinden von Ziegeln, Platten, Balken und Trägern die Reibung wieder „eingepflanzt“ ist. Die Zigarette, Zigarre oder Pfeife fiel aus dem Mund; anzünden könnten wir sie nur elektrisch, denn weder Feuerzeug noch Streichhölzer gäben Feuer. Unsere Kleidung würde sich in einzelne Fäden auflösen – alles zusammen je nach Temperament des Lesers ein Alptraum oder eine vergnügliche Vorstellung. Jedenfalls wäre ein Leben ohne Reibung nicht möglich; das ist sicher.



Folgerichtig bemüht sich der Mensch, die gute Reibung so groß zu machen, wie es nötig ist. Er baut Bremsen mit großer Wirkung, streut bei Glatteis Sand und stellt Sohlen her, deren Träger auch im Schnee „aufrechte Menschen“ bleiben. Auch für Kupplungen, wie sie jeder Kraftfahrer kennt, nutzt er die Reibungskraft aus: Freilich: Ganz folgerichtig wird der Mensch wohl nie werden, denn er bohrt die Fußböden nicht nur blank, sondern auch glatt; und er baut Badewannen mit (im Wasser besonders) glattem Boden. Schon mancher ist da ausgerutscht und hat sich einen Arm oder ein Bein gebrochen; wenn man in der Badewanne bei der Fußpflege rutschend nur mit dem Kopf unter das Wasser gerät, ist das nicht weiter



Beispiele der „guten“ Reibung: Kupplung und Bremsen

schlimm. Es gibt Bohnerwachs „mit Reibung“; man sollte nur diese Sorte noch herstellen und benutzen und die Böden der Badewanne rauh machen – wenn das Säubern für die Hausfrau dann auch etwas schwieriger wird. Wir wollen die Physik selbst erleben – aber schmerzlos. Daß unserer Hausfrau zu Beginn dieser ganzen Unterhaltung die Schüssel aus der Hand fiel, ist nicht zuletzt auf Mangel an Reibung zurückzuführen. Oder war die Trägheit der Masse, verbunden mit einer schwingvollen Bewegung, mit im Spiel? Wie dem auch sei – es ist an der Zeit, die Reibung ein wenig physikalisch zu betrachten.

Was ist überhaupt Reibung?

Wir wissen aus eigener Erfahrung, daß die Reibung einer bewegenden Kraft entgegenwirkt. Eine Kraft kann nur durch eine andere Kraft beeinflusst werden; also ist die Reibung eine Kraft. Wir sprechen daher auch von Reibungskraft oder – weil sie Widerstand leistet – von Reibungswiderstand. Am Rande ergibt sich die Erkenntnis, daß ein Widerstand eine Kraft ist. Die Reibungskraft tritt auf, wenn zwei in verschiedenen Richtungen bewegte Körper einander berühren – oder anders ausgedrückt: wenn zwei Körper einander berühren und sich dabei in verschiedenen Richtungen bewegen. Ganz einfach gesagt: Wenn zwei Körper aneinander gerieben werden, dann entsteht die Reibungskraft. Ob beide Körper oder nur einer dabei bewegt werden, das ist gleichgültig. Die Kraft „tritt auf“ oder „entsteht“, sagt man.

Sprechen und Denken sind untrennbar miteinander verbunden. Unserem Sprechen kann der kluge Zuhörer entnehmen, ob wir richtig, ungenau oder falsch denken. So gesehen, „entsteht“ keine Kraft aus dem Nichts, und keineswegs „tritt sie auf“ wie ein Schauspieler auf sein Stichwort hin. In Wirklichkeit wird stets umgewandelt! Nichts wird aus dem Nichts gewonnen, nichts geht verloren; die Summe der Kräfte bleibt. Wohin sollten sie verschwinden, und woher sollten sie urplötzlich kommen? Wir leben in einem riesigen System von Kräften der verschiedensten Art. Sie sind immer dagewesen und werden immer dasein, und sie sind grundsätzlich im Gleichgewicht. Wo sie einmal aus dem Gleichgewicht geraten (beispielsweise bei elektrischen Ladungen), da gleichen sie sich bald wieder aus, in unserem Beispiel etwa bei einem Gewitter. Der Mensch freilich in seinem Bestreben, die Naturkräfte zu erkennen und für sich arbeiten zu lassen, muß das Gleichgewicht hier und da stören, um den prompt folgenden natürlichen Ausgleich (wir sagen: das Wirken des Naturgesetzes) für sich auszunutzen. Er tut das im kleinen, wenn er den Hammer hebt, um einen Nagel einzuschlagen; er tut das im großen in riesigen Kraftwerken und ganz besonders beim Auslösen von Kernreaktionen. Hier werden die Kraftumsetzungen so riesig, daß der – kräftemäßig gesehen – winzige Mensch eine erhebliche moralische Größe einsetzen muß, um mit den Naturkräften fertig zu werden. Man muß wissen, wie man die Geister beherrschen kann, ehe man sie ruft. So großartig die Hilfsbereitschaft der Kernenergie im friedlichen Leben der Menschen ist – so unvorstellbar grausig, vernichtend wäre die Wirkung der in der Atombombe mißbrauchten Naturkraft. Das Naturgesetz hat keine Moral und kennt kein Erbarmen! Diese – nicht physikalische – Kraft muß der Mensch aufbringen.

Wir verstehen es jetzt ganz klar: Die Reibungskraft entsteht als neue Form einer gleich großen verschwindenden anderen Kraft; sie liegt nicht in irgendeinem Körper und wartet auf Abruf. Unsere Urahnen rieben einen Stab aus hartem Holz schnell in einem Stück weichen Holzes. Die Reibung entstand sofort aus einem Teil der Kraft, die den Stab drehte; sie zeigte sich programmgemäß als Gegenkraft. Die Reibungsarbeit setzte sich wiederum in Wärme um, in Reibungswärme; ein Feuerchen entstand. So geht



Wie groß ist die Reibungskraft (der Reibungswiderstand) eines bestimmten Körpers, und wie findet man diesen Wert?

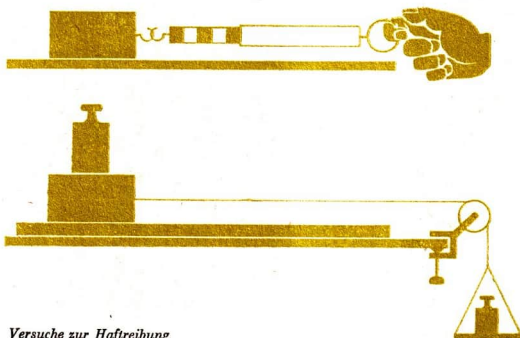
Wir messen einen Reibungswiderstand

Da es sich um eine Kraft (in kp oder p) handelt, können wir unseren Zugkraftmesser (1 kp) verwenden. Außerdem brauchen wir einen Holzklotz, etwa 4 cm mal 9 cm mal 12 cm. Im Notfall tut es auch ein mit trockenem Sand gefülltes mittelgroßes Zigarrenkistchen; seine Wände müssen freilich alle aus dem gleichen Werkstoff (Pappe oder Holz) bestehen. Eine der beiden kleinsten Seiten des Holzklotzes erhält eine Öse oder einen Haken.

Den Klotz legen wir mit einer Breitseite auf ein glattes Brett, etwa eine Tischplatte. In die Öse haken wir unseren Zugkraftmesser – und nun beginnen wir genau waagrecht zu ziehen, Klotz und Meßgerät gleichzeitig beobachtend. (Das ist gar nicht so leicht! Notfalls hilft jemand.)

Zunächst tut sich nichts am Klotz; er liegt weiterhin still da, durch die Haftreibung festgehalten. Der Zugkraftmesser dehnt sich mit steigender Zugkraft; wir beobachten, wieviel p er in dem Augenblick anzeigt, wo sich der Klotz in Bewegung setzt. Unsere Zugkraft ist der Reibungskraft entgegengesetzt, aber sie sind beide gleich groß. Der abgelesene Wert ist daher zugleich die Größe der Haftreibungskraft.

Wer keinen Zugkraftmesser hat, kann sich den Versuch nach der untenstehenden Abbildung mit Rolle, Waagschale und Wägestücken aufbauen. Er legt so lange vorsichtig immer mehr Wägestücke auf die Schale, bis der Klotz zu gleiten beginnt; die Kraft wird durch die Summe aus dem Gewicht der Wägestücke und dem Gewicht der Waagschale angegeben.



Versuche zur Haftreibung

Vorsicht – der Klotz gleitet immer schneller weiter! Warum? Die Haftreibung ist überwunden; jetzt wirkt nur noch die Gleitreibung, und die ist stets kleiner.

Nun kommt der wichtigste Versuch: Wir bestimmen die Größe der *Gleitreibungskraft*. Der Klotz muß bei diesem Versuch so stark gezogen werden, daß er gerade mit gleichbleibender Geschwindigkeit gleitet. Das läßt sich mit der Federwaage, das heißt unserem Zugkraftmesser, ebenso wie mit Waagschale und Wägestücken durchführen. Wir lesen jetzt die Größe der Gleitreibung ab. Sie ist geringer als die Haftreibung. Zur Abwechslung machen wir den gleichen Versuch mit dem auf eine Schmalseite gestellten Holzklotz. Die reibende Fläche ist jetzt kleiner, das Gewicht gleich. Die Reibung ist genau die gleiche wie vorhin. Wir haben damit bewiesen: *Der Reibungswiderstand ist bei gleichem Gewicht von der Größe der sich berührenden Flächen unabhängig*. Auf das Gewicht kommt es also an – und selbstverständlich auf die Art des Stoffes und der Oberfläche der Flächen. Daß rauhe Oberflächen mehr Reibung als glatte ergeben, ist mit unserem Gerät schnell nachzuweisen; man kann die Flächen mit rauhem Stoff oder mit feinem Schmirgelleinen bekleben. Bei dieser Gelegenheit können wir schnell und unauffällig die Sache mit der Druckkraft und dem Druck wiederholen: Der Holzklotz übt stets die gleiche Druckkraft (physikalische Kraft) auf seine Unterlage aus, ganz gleich, auf welcher Seite er liegt oder steht – sein Gewicht nämlich. Aber die technische Größe „Druck“ ändert sich, das heißt die Druckkraft je cm^2 . Sie ist bei jeder Lage anders. Und die Folgerung für die Reibungsgröße: Liegt der Klotz auf der größten Seite, so haben wir zwar den kleinsten Druck in kp/cm^2 , aber dafür um so mehr Quadratzentimeter der Fläche. Bei größerem Druck ist die cm^2 -Zahl entsprechend kleiner. Es hilft nichts: Das Gewicht des Klotzes bleibt unverändert, wie er auch liegt, und nur darauf spricht die Reibung an, nicht auf die Flächengröße.

Ganz anders wird die Sache, wenn wir auf den Klotz ein Wägestück legen. Wenn wir ein solches vom Gewicht des Klotzes drauflegen, so verdoppelt sich das Gewicht. Wir experimentieren in bekannter Weise damit und finden: Auch die Reibung hat sich verdoppelt. Es bleibt uns unbenommen, das gleiche mit dem dreifachen, vierfachen und so fort Gewicht zu tun; wir kommen zu der Erkenntnis: *Der Reibungswiderstand ist verhältnismäßig zum Gewicht des gleitenden Körpers*.

„Er ist der Normalkraft verhältnismäßig“, sagt der Physiker. Er will damit sagen, daß dieses alles nicht nur für das senkrecht nach unten wirkende Gewicht gilt, sondern für jede Kraft, die auf eine beliebige im Raum stehende Fläche *senkrecht* wirkt. Diese senkrechte Wirkung ist gewissermaßen „normal“; sie ist allein vollständig. Sobald eine Kraft schräg einwirkt, wird sie nicht voll wirksam; das wissen auch die Sportler, nicht zuletzt die Boxer. Man muß dann für die Rechnerei die Trigonometrie zu Hilfe nehmen.

Wir wollen einmal etwas anderes versuchen: das Brett, auf dem unser „Reibungskörper“ gleitet, am Ende etwas anheben. Es kommt, wie es kommen mußte. Die Reibungskraft wird mit steigendem Anhebungswinkel

immer geringer; bald rutscht der Körper von selber – die Schwerkraft hat gerade die Reibungskraft überwunden –, und schließlich (wenn das Brett senkrecht steht) fällt uns der Körper auf die Finger; von Reibung weit und breit nichts mehr zu merken.

Das kommt eben davon, wenn die Gewichtskraft nicht mehr senkrecht auf die Unterlage wirkt! Es erscheint selbstverständlich; aber diese Erkenntnisse sind auch wichtig für die Praxis. Laufbänder dürfen eine bestimmte Schräge nicht übersteigen, sonst rutscht das Transportgut zurück. Umgekehrt müssen Rutschbahnen jeder Art eine Mindeststeigung haben, damit niemand oder nichts unterwegs liegen bleibt.

Und der Werkstoff?

Daß die Reibungsgröße abhängig ist von der Art des Stoffes und seiner Oberfläche, wurde schon erwähnt. Aber wie viele Arten gibt es da! Nicht auszudenken. Der kluge Leser ahnt schon etwas: Das läuft auf eine Zahlentafel hinaus. Stimmt: auf eine Tafel, in der zu jedem Werkstoff eine Zahl gehört, die die Eigenarten des Stoffes (soweit sie die Reibung betreffen) erfaßt. Die Größe der Reibung R ist der Normalkraft F_N verhältnismäßig (proportional), das ist erwiesen. Das heißt aber nicht „gleich“! Wir müssen unseren Verhältnissatz so schreiben:

$$R \sim F_N.$$

Anderer Werkstoff – andere Reibung

Die nötige Zugkraft ist bei jedem Stoff anders, wir können das leicht selber prüfen, indem wir in unserer Reibungs-Versuchsanordnung statt des Holzklotzes entsprechende Stücke aus Metall und Plast (Kunststoff) nehmen. Wir können ferner die Fläche auswechseln, auf der der Körper gleitet, und die verschiedensten Kombinationen bilden: Stahl auf Stahl, Stahl auf Bronze (wie es in der Praxis vorkommt), Metall auf Holz, Leder auf Holz usw. Dabei braucht der gleitende Körper nicht vollständig aus dem betreffenden Stoff zu bestehen; es genügt beispielsweise eine kleine Platte aus Stahl mit einem aufgesetzten Wägestück mit dem Gewicht von 1 kp. Anschließend legen wir zwischen Unterlage und Gleitkörper einige Kugeln und danach einige Glasstäbe; die Zugkräfte werden wieder gemessen (aus der Ruhelage und während gleichbleibender Bewegung). Das ist das Prinzip der Rollenlager.

Zum Schluß benutzen wir die Unterlage mit etwas Schmieröl und lassen die Körper wieder auf die Fläche gleiten – ohne Kugeln und Stäbe. Das ist das Prinzip des geschmierten Gleitlagers.

Um die Ergebnisse rechnerisch auswerten zu können, schreiben wir unsere Beobachtungen auf, am besten in Form einer Zahlentafel:

Werkstoff oben und unten	Gewicht des bewegten Körpers	Zugkraft bei trockenen Flächen		Zugkraft bei Rollen oder Kugeln		Zugkraft bei geschmierten Flächen	
		I aus d. Ruhe- lage	II glei- tend	III aus d. Ruhe- lage	IV rollend	V aus d. Ruhe- lage	VI glei- tend
Holz auf Holz							
Stahl auf Bronze							
usw.							

Zugkraft und Gewicht werden in kp gemessen. Wir wollen unbedingt auf eine richtige mathematische Gleichung hinaus, mit der ein kluger Leser so gern arbeitet. Der Mathematiker kennt – wie stets, so auch hier – einen vortrefflichen Weg: Er setzt vor die rechte Seite unserer Verhältnisgleichung einfach einen Faktor; und weil dieser die unerwünschte Proportionalität (welch ein Wort!) gewissermaßen verschluckt und uns zu einer guten Gleichung verhilft, nennt er ihn „Proportionalitätsfaktor“ (noch schlimmer; neun Silben). Glücklicherweise hat er für dieses Wortungeheuer ein Kurzzeichen, das μ ; das ist der Buchstabe „mü“ aus dem griechischen Alphabet, unserem m entsprechend. (Was machten die Wissenschaftler ohne Latein und Griechisch?)

Nun dürfen wir schreiben

$$R = \mu \cdot F_N;$$

daraus ergibt sich sofort die physikalische Bedeutung von μ , nämlich der Quotient $\frac{R}{F_N}$. Wir brauchen nur die Reibungskraft (das heißt: unsere im Versuch gemessene Zugkraft) durch das Gewicht des Holzklotzes zu teilen, um μ – wir wollen es einfach *Reibungszahl* nennen – zu erhalten. Diese Reibungszahl kennzeichnet Stoff und Oberfläche. Sie ist ein bescheidener Faktor ohne Dimension, weil kp in Zähler und Nenner des Quotienten weggehoben wird.

Wir nehmen unsere Werte aus den Versuchen her und teilen jeweils die Zugkraft durch das Gewicht. Das ergibt sechs weitere Spalten der Zahlentafel:

$\frac{\text{Zugkraft}}{\text{Gewicht}} = \text{Reibungszahl}$					
I	II	III	IV	V	VI

Die Spalten I, III und V mit der Zugkraft aus der Ruhelage ergeben die Haftreibungszahlen μ_0 , die übrigen die Gleit- beziehungsweise Rollreibungszahlen μ .

Außer unseren Versuchen sind viele andere für alle wichtigen Werkstoffe gemacht worden. Wir finden ihre Ergebnisse in Tabellensammlungen.

Mit Hilfe dieser Zahlen kann man die Kraftverluste durch Reibung von Anfang an in die Rechnung einbeziehen, und man kann ebenso feststellen, ob eine nötige Reibung ausreichend groß ist. Ist die Reibungszahl beispielsweise gleich 0,1, so bedeutet dies, daß die Reibungskraft R ein Zehntel der Normalkraft (des Gewichtes des gleitenden Körpers) beträgt.

Der erste, der sich mit den Reibungsfragen experimentell und rechnerisch beschäftigte, war der französische Physiker und Ingenieur Charles Augustin de Coulomb (1736 bis 1806). Es war kein Zufall, daß jemand, der zugleich im physikalischen und im technischen Bereich arbeitete, im besonderen die Reibung untersuchte; die damit zusammenhängenden Fragen betreffen beide Bereiche. Sie sind geradezu ein Musterbeispiel für die Verflechtung von Naturwissenschaft und Technik. Besonders bekannt geworden ist Coulomb durch sein Gesetz aus der Elektrizitätslehre.

Übrigens hat die Geschwindigkeit der sich bewegenden Körper in den Bereichen, die wir betrachten, keinen wesentlichen Einfluß auf die Größe der Reibungskraft; das ändert sich erst bei sehr großen Geschwindigkeiten. Dort wird die Reibung erheblich stärker; die sehr schnell fliegenden Meteoriten verglühen beispielsweise durch die Reibung mit der Lufthülle der Erde. Wir dürfen die Geschwindigkeit aus unseren Überlegungen weglassen.

Einige weitere Versuche zur Reibung

Unbewußt getan

Wir reiben Daumen und Zeigefinger einer Hand aneinander, um die Rauheit der Haut zu prüfen. Wir prüfen zwischen den Fingern die Glätte der Oberfläche von Papier und Stoffen. Wir reiben in kalter Luft die Hände fest aneinander und erzeugen dadurch wohlthuende Reibungswärme; zum gleichen Zweck bewegen wir in der Kälte die Beine. Das alles sind physikalische Vorgänge, die wir unbewußt, aus eigener Erfahrung, auslösen; selbst erlebt — nur meist nicht gewußt, daß auch Physik darinsteckt.



Ein Stab hält sich selbst im Gleichgewicht

Nehmen wir einen Holzstab, etwa einen Besenstiel, einen Spazierstock, ein mindestens 50 cm langes Lineal, ein Billard-Queue oder ähnliches, und legen wir ihn an den Enden waagrecht auf die Zeigefinger beider Hände. Nun führen wir beide Zeigefinger gleichzeitig langsam nach der Mitte des Stabes zu. Wir beobachten etwas Merkwürdiges (des Merkens Würdiges): Der Stab bleibt im Gleichgewicht! Einmal rutschen beide Finger gleichmäßig unter ihm; dann bleibt der Stab an einem Finger hängen und gleitet nur über den anderen – aber nur eine kurze Strecke. Die andere Seite holt schnell auf; der Ausgleich kommt immer mit Sicherheit, ehe der Stab fällt. Schließlich treffen die Finger einander unter dem Schwerpunkt des Stabes. Warum?

Bei einem ganz gleichmäßig geformten Stab liegt der Schwerpunkt genau in der Mitte. Ist (bei einem Spazierstock beispielsweise) an einem Ende eine zusätzliche Masse (Krücke oder Knauf), so verschiebt sich der Schwerpunkt ein wenig in diese Richtung; er liegt dort, wo man den Stab auf einem Finger im Gleichgewicht halten kann. Das ist leicht festzustellen. Bei der Auflage auf zwei Fingern verteilt sich die Last des Stabes. Sind beide Finger gleich weit von den Stabenden entfernt, so trägt jeder Finger die halbe Stablast, und beide müßten gleichmäßig nach innen rutschen, dabei immer die Hälfte der Last tragend. Aus irgendeinem Grunde – etwa durch eine raue Stelle am Stabe – bleibt der Stab jedoch gelegentlich über einem Finger stehen, und er gleitet nur über den zweiten weiter. Dadurch hat dieser zweite Finger sehr bald einen größeren Längenanteil des Stabes als der andere zu tragen, bei dem der Stab steckengeblieben war. Sofort vergrößert sich das Gewicht und damit die Reibungskraft, die auf den zweiten Finger wirken; sie werden größer als die zufällige Reibung bei Finger Nr. 1 – und sofort rutscht dieser weiter, während zur Abwechslung der zweite Finger unter dem Stab stillsteht. Sind beide Finger gleich weit vom Mittelpunkt des Stabes entfernt, gleiten sie beide wieder gleichmäßig weiter zum Mittelpunkt. Ein Beweis für die Richtigkeit des Satzes, daß die Reibungskraft von der Größe des Gewichts abhängig ist.

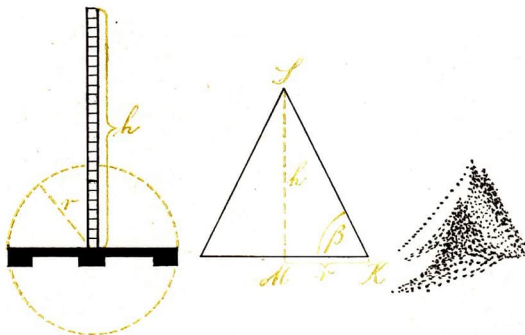
Wer bei diesem Versuch sehr genau beobachtet, kann den Unterschied zwischen Haftreibung und Gleitreibung feststellen: Der gleitende Finger rutscht etwas weiter, als er genau genommen dürfte. Er hat nur die Gleitreibung zu überwinden, während am anderen Finger die (größere) Haftreibung wirkt.

Vom Schüttwinkel zur Haftreibungszahl

Schon das kleine Kind erfreut sich daran, aus einer gewissen Höhe trockenen Sand immer auf dieselbe Stelle fallen zu lassen und ein hübsches Gebilde entstehen zu sehen – einen Kegel, wie es später in der Schule lernt. Wir haben die kindliche Freude an diesem Geschehen hoffentlich nicht verloren und wollen das Spiel, diesmal mit ernstem Hintergrund, wiederholen. Dazu brauchen wir eine kreisrunde Holzscheibe mit 10 cm Durchmesser,

drei Füße dazu und einen dünnen, 10 cm langen Holzstab mit einer Millimeteinteilung. Den Stab befestigen wir senkrecht genau in der Mitte der Holzscheibe mit den drei Füßen. Das Ganze stellen wir auf einen großen Bogen Packpapier und beginnen den Versuch: Wir lassen trockenen Sand von oben am Stab entlang (aus einem Papiertrichter oder dergleichen) hinabfallen. Ein Kegel bildet sich, dessen Grundfläche der Kreisscheibe

Der Schüttkegel



entspricht und dessen Spitze an dem senkrechten Stab liegt. Und wenn wir noch so viel Sand nachschütten – die Höhe h des Kegels, am Stab abzulesen, ändert sich nicht mehr. Der Mantel des Kegels bildet mit der Grundfläche einen bestimmten Winkel, hier β genannt (der griechische Buchstabe „beta“). Das ist der *Schüttwinkel*; er gehört zur Familie der *Reibungswinkel*.

Die Höhe h unseres Kegels steht für jeden körnigen Werkstoff in einem bestimmten (stoffeigenen) Verhältnis zum Radius r der Grundfläche, das heißt, dieses Verhältnis $\frac{h}{r}$ ist bei dem gleichen Werkstoff immer gleich.

Es ist die *Haftreibungszahl* μ_0 für den verwendeten Sand! Wir können mit Hilfe der Trigonometrie und der obenstehenden Abbildung auch die Verbindung mit dem Schüttwinkel β herstellen.

Wir schneiden in Gedanken den Sandkegel senkrecht mittendurch und erhalten als Schnittbild ein gleichschenkliges Dreieck, das sich aus zwei rechtwinkligen Dreiecken zusammensetzt. Wir betrachten eines dieser beiden. Im Dreieck MKS ist MS die Schütthöhe h und MK der Radius r des Sandkegels. Der Schüttwinkel β liegt bei K.

Ein rechtwinkliges Dreieck hat außer seinem rechten Winkel (90°) stets noch zwei spitze Winkel (unter 90° groß); alle zusammen betragen 180° . Einer der spitzen Winkel ist unser Schüttwinkel β . Der rechte Winkel hat zwei Schenkel (h und r), die Katheten. Für β ist h die Gegenkathete (weil gegenüberliegend) und r die Ankathete (weil anliegend). Wir wissen, daß $\frac{h}{r}$ — die konstante Haftreibungszahl ist; bei diesem Größenverhältnis bleiben

die Körner stets gerade aneinander haften.

Der Mathematiker kann nun aus diesem Verhältnis die Größe des Winkels β berechnen. Um die Schreiberei zu vereinfachen, nennt er das Verhältnis von Gegenkathete zur Ankathete stets den Tangens, abgekürzt „tan“, des zugehörigen Winkels; in „Zahlentafeln der natürlichen Werte“ hat er zu jedem Winkel den zugehörigen Tangens aufgeschrieben und in den Logarithmentafeln abgedruckt. Wir brauchen also nur h durch r zu teilen, das Ergebnis (die Haftreibungszahl) in der Tangenstafel zu suchen und den dazugehörigen Winkel in Grad abzulesen.

Wem das alles noch zuviel ist, der kann am sandgefüllten Gerät die Punkte S und K durch einen Faden verbinden, den Sand entfernen und den Schüttwinkel β mit einem Winkelmesser ablesen. Selbstverständlich kann man dann auf der Tangenstafel zu dem gemessenen Winkel den Tangens ablesen und auf diese Weise die Haftreibungszahl erhalten; $h:r = \tan \beta = \mu_0$.

Je gröber und kantiger der körnige Werkstoff ist, den wir untersuchen, um so größer ist der Schüttwinkel β beziehungsweise sein Tangens als Haftreibungszahl. Das ist für Baufacharbeiter wichtig.

Der widerspenstige Zug

Hier geht es um etwas, das auch im Zusammenhang mit der Trägheit sehr erwähnenswert ist: die Schwierigkeit, einen stehenden Zug zum Fahren zu bringen. Damals hatten wir der Trägheit die Schuld in die Schuhe geschoben. Sie hat das nicht weiter übelgenommen, weil sie tatsächlich hauptsächlich schuldig ist; wir müssen aber jetzt unser Wissen erweitern, verbessern, verfeinern.

Die Haftreibung ist der zweite Schuldige am Ärger des Lokomotivführers, wenn sich der vorher mit Bremsen angehaltene Zug — mit auseinandergezogenen Kupplungen also — nicht im ganzen wieder bewegen läßt. Wir haben den Ausweg aus dieser Schwierigkeit schon alle selber erlebt: Die Lokomotive stößt den Zug zurück, bis alle Wagen eng aneinanderstehen und alle Kupplungen locker hängen. Dann zieht sie an und setzt jeden Wagen einzeln, der Reihe nach, in Bewegung.

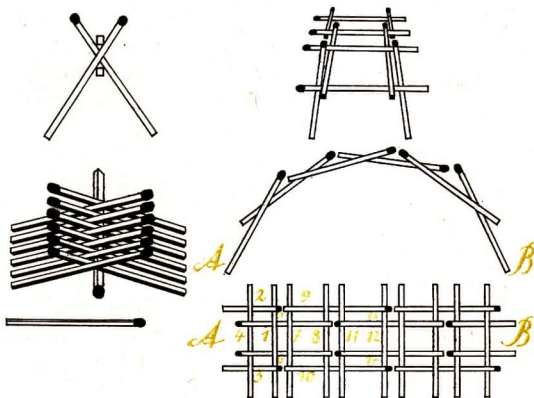
Das können wir im Versuch auf unserer bewährten Anordnung zum Messen der Reibungskraft nachahmen — jetzt am besten mit Rolle, Waagschale und Wägestücken. An Stelle des einen Holzklotzes legen wir als Symbol des Wagenzuges eine Reihe von mehreren kleinen Klötzen, insgesamt etwa 1 kp schwer, auf die Gleitbahn — alle durch kurze Bindfäden miteinander verbunden.

Vom vordersten „Wagen“ läuft ein Faden über die Rolle zur Waagschale. Die „Wagen“ werden so weit wie möglich auseinandergezogen; die Verbindungsfäden (die Kupplungen darstellend) müssen straff gespannt sein. Wir legen so viele Wägestücke auf die Schale, daß der Zug gerade eben nicht anfährt; die Zugkraft ist etwas kleiner als die Summe der Haftreibungskräfte bei allen Klötzchen. Wir heben die Waagschale etwas an und schieben die „Wagen“ zusammen. Dann lassen wir die Schale vorsichtig wieder los – und der „Zug“ fährt los, ein „Wagen“ nach dem anderen setzt sich in Bewegung. Die Gleitreibung ist kleiner als die Haftreibung; die Zugkraft der „Lok“ reicht jetzt aus.

Die haftenden Streichhölzer

Arthur Good berichtete 1890 in seinem vergnüglichen Experimentierbuch „La science amusante“ von folgendem Versuch zur Haftreibung und zum Reibungswinkel: Über ein (möglichst vierkantiges) Streichholz legt man vierzehn weitere derart, daß die Köpfe abwechselnd nach links und rechts in die Höhe ragen und die leeren Enden auf dem Tisch liegen. Ein fünfzehntes Streichholz wird in die Furche gelegt, die die einander kreuzenden Hölzer oben bilden. Nun faßt man das zuerst hingelegte (unterste) Streichholz am Ende fest an und hebt es hoch. Die Haftreibung reicht aus, um alle Streichhölzer mit in die Höhe gehen zu lassen. Saubere, gerade Hölzer sind nötig – und eine ruhige Hand.

Haftende Streichhölzer und Streichholz-Brücke



Die Streichholzbrücke

Derselbe Verfasser hat unter Ausnutzung der Reibung mit Streichhölzern sogar eine Brücke gebaut. Man legt das Streichholz 1 auf den Tisch, darauf die Enden von 2 und 3 und quer darüber 4, hebt mit Daumen und Zeigefinger der linken Hand 1 hoch und schiebt mit der rechten Hand 5 und 6 unter 1 hindurch auf 4. Das Ganze bildet einen kleinen Bock, der frei auf dem Tisch steht. Man legt nun 7 über 5 und 6, ferner 8 unter die Enden von 5 und 6. Nr. 8 hebt man vorsichtig an und schiebt 9 und 10 ein, deren linke Eckchen auf 7 ruhen. Auf diese Weise fährt man fort, bis die Brücke die gewünschte Länge erreicht hat.

Der gleitende Schlüssel

Zum Abschluß ein sehr einfacher Versuch, der den erheblichen Unterschied zwischen Haftreibung und Gleitreibung zeigt. Wir schieben einen Schlüssel mit seinem Griff (Ring) über einen langen Bleistift. Der Bleistift wird ein klein wenig schräg gehalten, so daß der Schlüssel noch nicht gleitet. Sobald wir den Stift ein wenig drehen, rutscht der Schlüssel sofort nach unten.

Nachdenkliches zur Reibung

Von der quietschenden Straßenbahn in der Kurve war schon einmal die Rede. Wodurch entstehen diese scheußlichen Töne?

Zum Geigenspiel (oder zum Musizieren auf einem anderen Streichinstrument) gehören Haftreibung und Gleitreibung. Wieso? Der begeisterte Zuhörer wußte es nicht, als er in die bekannten Worte ausbrach: „Nein, welche Töne doch solch ein einfacher Darm hervorbringt!“ Wer seinem Violinlehrer einmal einen Streich gespielt hat (in völliger Verknennung des Ausdrucks „Streichinstrument“), indem er ihm heimlich Fett auf den Bogen schmierte, beging freilich eine schlimme Tat; aber er hat dabei immerhin Verständnis für physikalische Zusammenhänge bewiesen.

Wir legen als Gleitkörper ein Tuch oder eine dünne Kette so auf einen Tisch, daß ein Stück des Tuches oder der Kette über die Tischkante hinweg senkrecht herabhängt. Dann schieben wir den Gleitkörper langsam weiter an die Kante – gerade bis zu dem Augenblick, wo er von selbst weiterrutschen will. Jetzt halten wir ihn schnell fest, messen die liegende und die hängende Strecke und berechnen daraus die Reibungszahl. Ein Tip dazu: an das rechtwinklige Dreieck beim Sandkegel denken und die Anordnung aufzeichnen.

Ein Körper gleitet eine geneigte Ebene (angehobene Gleitfläche) beschleunigt abwärts. Was tut sich da physikalisch? Beim Beantworten dieser schwierigen Frage denkt man am besten an den abwärtsfahrenden Fahrstuhl und an die Normalkraft.



Wer mit einem Dampfer gefahren ist oder an der „Wasserkante“ wohnt, der kennt das: Wenn das Schiff anlegen will, wirft der Matrose eine starke Leine über Bord auf den Kai. Hier fängt ein Mann sie geschickt auf und wickelt sie schnell mehrmals um einen Poller (eine zylindrische, niedrige Säule aus Stahl oder Holz). Manchmal sind auch zwei solcher Poller dicht nebeneinander angeordnet; dann wird das Ende der Leine in Form einer 8 um beide gelegt. Das Schiff hat, obwohl durch die rückwärts laufende Maschine abgebremst, noch ziemlich viel Bewegungsenergie (Trägheit). Muß der Mann am Poller wohl noch eine große Kraft aufwenden, um die Leine zu halten?

Wenn man mit dem Kraftwagen eine nicht überhöhte Kurve schnell durchfährt, darf man nicht bremsen. Warum nicht? Da, hängt mit Fliehkraft und Reibung zusammen. Die Reibung zwischen Rädern und Straße hat genug zu tun, um die Wirkung der Fliehkraft auszugleichen, das heißt den Wagen vor dem Wegrutschen zu bewahren. Durch das Bremsen kommt eine weitere Kraft hinzu. Sie hat zwar eine andere Richtung als die Fliehkraft; aber die Resultierende aus beiden Kräften ist hier größer als jede Einzelkraft, und es ist durchaus möglich, daß der Wagen nunmehr fortgeschleudert wird.

Und damit genug der Reibung!

Gegenkraft und allerlei Stöße

Ach, diese ewigen Kräfte! Sie hören nicht auf, und immer wieder kommen neue hinzu . . . Nein, wir wollen lieber sagen: Wir entdecken gute alte Bekannte in neuen Gewändern; das hört sich nicht nur freundlicher an, sondern es ist auch so.

Die alte Bekannte

Daß jede Kraft eine Gegenkraft auslöst ($\text{actio} = \text{reactio}$) wissen wir, seit wir mit physikalischem Bewußtsein auf Sprungfedern sitzen oder liegen. Wer mit dem Kopf gegen die Wand knallt, tröstet sich (vielleicht auch nicht) mit dem Gedanken, daß die Gegenkraft der Wand an der Beule und am Schädelbrummen schuld ist. Die Trägheit, die immer so prompt auftritt, ist ein Muster einer Gegenkraft. Die gelegentlich auftretende Widerborstigkeit beim Menschen darf damit nicht ohne weiteres verglichen werden!

Wenn wir aber mit dem Daumen kräftig auf den Tisch drücken und trotz aller Mühe nicht in das Holz hineinkommen, dann bedeutet das: Die Gegenkraft im Holz ist ebenso groß wie unser Daumendruck, nur entgegengesetzt gerichtet; beide Kräfte heben einander auf. Drückt man den Daumen etwa in Plastilin, so ist die Daumenkraft stärker als die Gegenkraft; auf der Seite des Daumens bleibt ein Überschuß von Kraft, der den Daumen weiter eindringen läßt – bis die Gegenkraft gleich groß wird. Dann kommt der Daumen zur Ruhe.

Kraft und Gegenkraft an der Schraubenfeder

Der Vorgang ist nicht neu; neu ist nur die Art, wie wir ihn betrachten: Wir halten eine Schraubenfeder (Wendelfeder) am oberen Ende fest und hängen unten eine Masse an. Die Feder dehnt sich durch die Wirkung der Schwer-

kraft aus; unsere Hand leistet die Gegenkraft. Lassen wir Feder und Masse fallen, so wirkt nur noch die Schwerkraft auf beide; die Feder zieht sich sofort auf ihre ursprüngliche Länge zusammen und fällt gemeinsam mit der Masse zu Boden. Von der Masse her wirkt keine Kraft mehr auf die Feder ein.

Die Waage merkt nichts

Zwei Kinder stellen sich auf eine Personenwaage. Das eine Kind zieht das andere an den Haaren oder an der Jacke hoch – die Waage zeigt unverändert das Gesamtgewicht an. Warum?

Das eine Kind ist leichter geworden, weil das zweite einen Teil des Gewichtes trägt; aber das zweite Kind ist dadurch um diesen Gewichtsteil schwerer geworden. Eine Kraft ist verlagert worden; die Summe ist gleich geblieben; die Kraft hat die gleich große Gegenkraft gefunden.

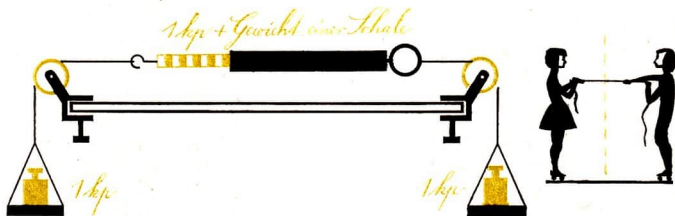
Kräfte auf Rollschuhen

Die beiden Kinder – es dürfen jetzt auch Erwachsene sein – schnallen sich Rollschuhe an, stellen sich im Abstand von 1 bis 2 m gegenüber auf und ziehen zur selben Zeit an einer Schnur, von der jedes ein Ende in der Hand hat. (Man kann den Versuch auch mit zwei kleinen Rollwagen machen.)

Was wird geschehen? Beide Personen treffen einander genau in der Mitte des Abstandes, gleiche Reibung bei den Rollschuhen vorausgesetzt. Nun, das war vorausdenken. Was tut sich aber, wenn nur eine Person zieht und die andere sich ziehen läßt? Erstaunlich: Beide treffen einander wieder in der Mitte! Die „gezogene“ Person hat in ihrem Körper eine Gegenkraft hervorgebracht, genauso groß wie die Zugkraft des Mitspielers.

Wir können den Versuch abwandeln, indem wir nur eine Person mit Rollschuhen ausstatten und das Seil mit dem anderen Ende über einen Zugkraftmesser an einer Wand befestigen. Der Rollschuhläufer zieht sich an die

Kraft und Gegenkraft



Wand heran, und der Messer zeigt die Gegenkraft an, mit der jetzt die Wand reagiert. Dieses Wort kommt wie „reactio“ vom lateinischen *reāgere* = zurück-, entgegengesetzt wirken. Wer keine fahrbaren Untersätze hat, kann den Versuch auf „rein physikalische Weise“ machen. Dabei läßt sich die Größe der Zugkraft besonders gut feststellen. Wir führen eine Schnur, die in der Mitte durch einen Zugkraftmesser unterbrochen ist, über zwei Rollen; links und rechts befestigen wir an den Enden der Schnur je eine Waagschale. Der Messer mag einen Meßbereich von 1 kp haben; dann legen wir auf jede Schale ein Wägestück mit dem Gewicht von 500 p. Ziehen die beiden Massen wohl den Messer auf 1000 p auseinander (das Gewicht der Schalen nicht berücksichtigt)? Merkwürdig: Der Zugkraftmesser zeigt nur 500 p an! Warum? Die Sache wird uns sofort klar, wenn wir das eine Ende der Schnur einfach festhalten, vielleicht schon oben an der Rolle. Wie sollte da der Messer wohl mehr als das Gewicht des nun übriggebliebenen anderen Stückes anzeigen, nicht wahr? Das ausgeschaltete Gewicht hat nur die Gegenkraft aufgebracht, die gewissermaßen die Befestigung des einen Endes ersetzt hat.

Zwei Kräfte addieren sich sowieso nur, wenn sie auf derselben Wirkungslinie (die hier allerdings vorhanden ist) in derselben Richtung wirken – das ist hier aber nicht der Fall. Sie wirken einander entgegengesetzt und heben einander dadurch auf, daß sie auch noch gleich groß sind. Die trotzdem vorhandene, aber nach außen nicht mehr sichtbare Wirkung muß die Schnur aushalten. Das ganze „System“ steht auf diese Weise still; es handelt sich um einen Fall aus der Statik (lateinisch: *stare* = stehen), in der solche ruhenden Sachverhalte behandelt werden. Ist keine Gegenkraft, wie im Versuch betrachtet, vorhanden, so bewirkt die Kraft eine Änderung des Zustandes, eine Bewegung oder die Änderung einer Bewegung. Das gehört dann in die Dynamik, die Lehre von den Bewegungen. Das Wort kommt aus dem Griechischen: *dýnamis* = Kraft. Kraft in Bewegung ist damit gemeint. Ganz richtig ist die Bezeichnung nicht, denn die Statik hat genauso gut mit Kräften zu tun – aber die Wörter sind nun einmal eingeführt, und wir müssen uns die Bedeutung merken. Wir können jetzt auch die gern gestellte Prüfungsfrage beantworten: Otto von Guericke (1602 bis 1686) hat 1654 auf dem Reichstag in Regensburg seine berühmten Halbkugeln vorgeführt, die durch den Luftdruck zusammengepreßt wurden. An jeder Halbkugel zogen acht Pferde. Wieviel „Pferdestärken“ muß die Kugel aushalten? Ja – nur acht. Guericke hätte die eine Halbkugel auch mit einem starken Seil an einer Mauer befestigen können; dann wäre sofort klar, daß die zweiten acht Pferde nur die Gegenkraft liefern.

Wenn die Kraft nun ein Loch findet?

Ein zusammengepreßtes Gas, beispielsweise in einem geschlossenen Gefäß, drückt gleichmäßig nach allen Seiten. Das Gas ist in Ruhe; die Gefäßwand muß an allen Stellen die gleich großen Gegenkräfte liefern. Alles ist im Gleichgewicht; die Druckkraft, die das Gefäß nach rechts bewegen möchte,

wird durch die Kraft ausgeglichen, die das gleiche nach links schaffen möchte. Die arme Gefäßwand muß diesen allseitigen Ansturm allerdings aushalten – andernfalls explodiert die ganze Geschichte (entsprechend nach allen Seiten). Die untenstehende Abbildung zeigt das zweidimensional betrachtet.

Was geschieht, wenn die Druckkraft an einer Stelle ein Loch vorfindet, beispielsweise links? Dann saust dort das Gas (in unserem Beispiel) hinaus; die Druckkraft des Gases wird an der Stelle Null. Die entsprechende Kraft auf der entgegengesetzten Seite wirkt aber weiter (weil dort die Gefäßwand dicht ist); sie drückt das Gefäß tatsächlich fort – in der dem ausströmenden Strahl entgegengesetzten Richtung. Das ist die *Rückstoßkraft* und das *physikalische Wirkungsprinzip aller Raketenantriebe*!

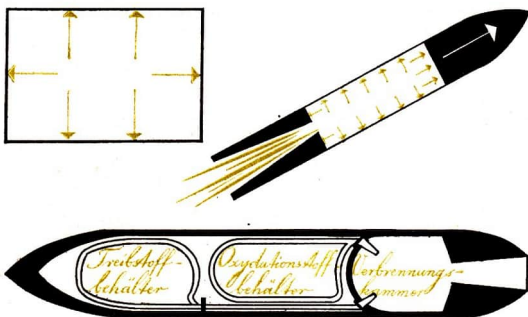
Man spricht vom Schub als Antriebskraft. Es handelt sich also nicht um eine Abstoßung an der Luft, sondern um die Wirkung eines Druckkraft-Überschusses an einer Stelle innerhalb des Gefäßes; diese Kraft wirkt auch im luftleeren Raum.

Wir merken uns also: Der Rückstoßantrieb braucht keine Luft wie ein Propellerantrieb und keine Reibung wie ein Fahrzeug mit Rädern. Die Wirkung der Rückstoßkraft ist besonders eindeutig sichtbar. Das (lateinische) Fremdwort für Rückstoß ist Repulsion; der Puls hängt damit zusammen, denn das Blut wird durch die Herzfähigkeit stoßweise durch den Körper befördert.

Der Grundsatz des Rückstoßes gilt nicht nur für Gase, sondern auch für Flüssigkeiten. Wir wollen unseren ersten Versuch mit Wasser machen.

In ein möglichst leichtes, schmales und hohes Gefäß, beispielsweise eine längliche Konservendose, bohren wir am unteren Rand irgendwo ein Loch; das wird zunächst durch einen Korken verschlossen. Die Dose hängen wir

Prinzipien der Rakete



Der Rückstoß des Wassers



an einem längeren Faden auf und füllen sie mit Wasser. Wir merken uns die Stellung des Gefäßes — etwa durch ein dahinter angebrachtes Lineal —, öffnen das Ausflußloch und lassen das Gefäß los. (Selbstverständlich haben wir vorher ein zweites Gefäß zum Auffangen des Wassers unter die ganze Anordnung gestellt.) Das Gefäß neigt sich merklich nach der dem Wasserstrahl abgewandten Seite. Auch der Druck des Wassers, der mit steigendem Wasserstand zunimmt, wirkt gleichmäßig nach allen Seiten, wie wir sehen. Wer sich nicht scheut, die Schienen seiner Spielzeug- oder Modelleisenbahn einmal naß werden zu lassen, der setzt die Dose auf einen leicht laufenden Wagen — mit der Öffnung oberhalb des Gleises. Der Wagen fährt mit Rückstoß. Ob das noch einmal Wirklichkeit werden wird?

Ein Mann namens Segner kam auf den Gedanken, den Rückstoß so auszunutzen, daß eine umlaufende Bewegung entstand, und er baute sein Wasserrad. Wir können es leicht nachbauen. In der Konservendose bohren wir gegenüber dem ersten noch ein zweites Loch. In beide werden durchbohrte Korken gesteckt und in diese umgebogene kurze Glasröhren, die in eine Spitze auslaufen. Diese Spitzen müssen waagrecht nach entgegengesetzten Richtungen zeigen. Sobald das Wasser aus den Röhrchen herausspritzt, beginnt sich die Dose zu drehen. Nach diesem Grundsatz sind alle umlaufenden *Rasensprenger* gebaut.

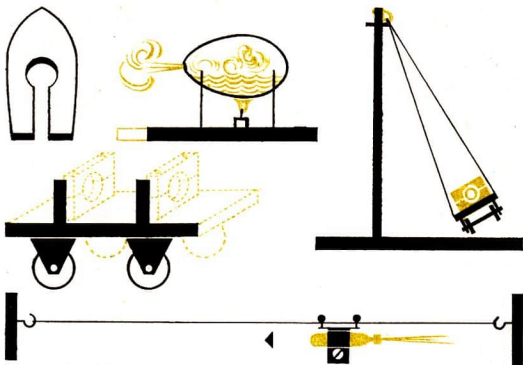
Zwei Boote mit Rückstoßantrieb

Das erste ist sehr leicht zu bauen. Wir sägen oder schneiden aus Sperrholz oder Pappe das Boot in der Form aus, wie sie die umstehende Abbildung zeigt. Es ist zweckmäßig, das Holz, vor allem aber die Pappe, wasserdicht zu machen, beispielsweise durch einen dünnen Anstrich mit Lack oder flüssigem Paraffin. Wir legen das Boot auf ruhiges Wasser und lassen einen Tropfen Öl in den ausgeschnittenen Kreis des Bootes fallen — schon fährt es ab. Das Öl will sich schnell ausbreiten, findet nur den kleinen Kanal frei, läuft durch diesen (der nicht zu breit sein darf) hinaus und drückt auf der entgegengesetzten Seite das Boot vorwärts. Das zweite Boot ist schwieriger zu bauen. Unsere Abbildung zeigt: Ein ausgeblasenes Ei, eine Eierschale, ruht auf vier entsprechend zurechtgebogenen Drahtstücken (etwa Büroklammern). Es ist halb mit Wasser gefüllt, und das vordere der beiden (zum Ausblasen nötigen) Löcher ist mit Siegellack oder Plastkleber verschlossen.

Unter dem Ei, das hier einen Dampfkessel darstellt, ist ein Kerzenrest oder ein Stück Watte, mit Brennspritus getränkt, angebracht, groß genug, um mit seiner Flamme das Wasser im Ei zum Sieden zu bringen. Am Heck des Schiffchens können wir einen Blechstreifen als Ruder anbringen (die Landratten sagen „Steuer“, aber das ist falsch). Gute Fahrt!

Der Raketenwagen

Wer hat einen Heimsprudler? Auch wer keinen besitzt, kann die dazugehörenden Kohlendioxid-„Bömbchen“ kaufen. Sie enthalten das Gas in



Raketenfahrzeuge

sehr komprimierter Form; und wenn man mit einer Nadel die zugelötete Öffnung durchstoßen hat, kommt das Kohlendioxid (CO_2) unter großem Druck heraus. Wir merken schon in der Hand, daß das kleine Gefäß fortgedrückt wird. Diesen Rückstoß wollen wir in drei Versuchen ausnutzen. Zunächst also der Raketenwagen! Wir befestigen das Bömbchen auf dem leichtesten Wagen, den wir in unserem Modellwagenpark haben. Man kann das mit zwei kleinen Holzböcken machen, die eine halbkreisförmige Ausparung haben; von oben werden entsprechende Oberteile aufgeschraubt. Mit dem Wagen werden die Böcke durch Verschrauben oder Kleben oder durch umgelegte, mit den Böcken verschraubte Metallbänder verbunden. Man kann das Bömbchen auch einfach mit Draht festbinden – Hauptsache, es sitzt „bombenfest“ und nimmt das Wägelchen mit. Der Raketenwagen wird „geladen“ sorgfältig auf die Schienen gesetzt und sehr fest gehalten; ein Helfer schlägt mit einer starken Stahlnadel vorsichtig die Lötichtung durch. Wenn das Bömbchen nicht gerade ein Blindgänger war, dann braust der Raketenwagen los. Da er eine sehr hohe Geschwindigkeit erreichen kann, soll man nur gerade Schienen verwenden oder Kurven überhöhen und auf jeden Fall am Schienenende ein Kissen als Puffer aufbauen.

Das Öffnen der Bombe soll vorsichtig erfolgen. Der Gasstrahl, der sehr kräftig und mit niedriger Temperatur (warum?) ausströmt, darf auf keinen Fall auf die ungeschützte Haut treffen. Es kommt dabei leicht zu starken Erfrierungen. Die Augen schützen wir am besten durch eine Schutzbrille, die Hände durch Handschuhe. Wir dürfen die gefüllten Bomben keinesfalls auf die warme Heizung oder den warmen Ofen oder in die Sonne legen; der Druck des Kohlendioxids wird dann so groß, daß eine Explosion möglich ist. Also recht kühl lagern!



Der fliegende Raketenwagen

Ist der Wagen des vorigen Versuches leicht genug, so können wir ihn zum Fliegen bringen; dieser zweite Versuch zeigt außerdem sehr schön die Ziehkraft (Zentralkraft) und ihre Gegenkraft, die Fliehkraft. Ein kräftiger Holz- oder Metallstab, 30 bis 50 cm lang, wird sehr fest auf der Tischplatte befestigt; oben erhält er einen Metallstift (Nagel, Schraube). Um den Stift liegt locker ein Metallring; mit diesem Metallring werden alle vier Ecken des Wagens durch Bindfäden verbunden, die etwa 10 cm länger als die Stange sind. Der Metallring darf nicht so groß sein, daß er über die Stange hinunterrutschen kann; er soll die Bindfäden drehbar halten. Eine Scheibe auf dem Stab kann das Rutschen sicher verhindern. Wir öffnen das Bömbchen und lassen den Wagen los; das Fahrzeug hebt sich durch die Fliehkraft. Der Stab übernimmt die Zentralkraft; der Bindfaden wird durch die Kraftwirkung etwas gedehnt – das muß er aushalten. Und der Antrieb? Wieder der Rückstoß.

Die fliegende Rakete

Der letzte Versuch mit dem Kohlendioxid-Bömbchen ist ebenfalls recht eindrucksvoll. Wir müssen am Ende der Bahn sogar den bleibenden Eindruck – an der Wand nämlich – dadurch vermeiden, daß wir dort ein Kissen anbringen. Die Bahn ist eine durch den ganzen Raum (er kann getrost 10 m oder länger sein) fest gespannte Schnur oder ein Draht; sie muß ganz glatt sein. Das Bömbchen bekommt zwei Metallringe an den Enden, mit Draht sicher befestigt. An diesen Ringen gleitet es an der Schnur entlang. Es saust sogar mit erheblicher Geschwindigkeit; zu Beginn kann man die Beschleunigung gut beobachten.

Bei diesem Versuch können wir mit Hilfe einer Stoppuhr leicht die Geschwindigkeit der Rakete messen: den Weg (in m) durch die Zeit (in s) teilen und auf eine Sekunde umrechnen. Dabei erhalten wir die mittlere Geschwindigkeit, wenn wir die Fahrzeit über die ganze Strecke messen. Wer zusätzlich der Wissenschaft zwei Bömbchen opfern will, mag die Beschleunigung in den ersten zwei Metern und die Höchstgeschwindigkeit in der zweiten Hälfte des Weges messen.

Der Luftballon mit Rückstoßantrieb

Dieser Versuch ist ebenso ungefährlich wie einfach. Wir blasen einen Luftballon auf, halten ihn mit der Mündung nach unten und lassen los. Der Ballon saust mit Rückstoßantrieb an die Decke!

In dieser und ähnlicher Art lassen sich noch viele Versuche machen. Der schöpferischen Phantasie des Lesers seien aber hier Grenzen gesetzt: Er soll keinesfalls Sprengstoffe irgendwelcher Art, Schießpulver und dergleichen, verwenden! Das ist zu gefährlich, weil die Kräfte und ihre Größen dabei nicht genügend vorausgesehen werden können; die Reaktionen laufen viel zu schnell ab. Die Verbindung zwischen Physik und Chemie wird zwar

immer enger, und wir werden die Chemie bei einigen elektrischen Versuchen noch sehr nötig haben; aber bei den Rückstoßversuchen bleiben wir bitte rein physikalisch!

Es fing damit an, daß . . .

. . . der griechische Physiker Heron von Alexandria etwa 120 Jahre vor unserer Zeitrechnung die erste uns bekannte Maschine baute, die nach dem Prinzip des Rückstoßes arbeitete, eine Dampfmaschine, die unsere nebenstehende Abbildung zeigt. Im Kessel (1) brachte er Wasser zum Sieden, leitete den Dampf durch zwei Röhren (4) in eine drehbar angeordnete Kugel (2), den Dampfkreisler oder „Aeolusball“. Die Kugel hatte zwei rechtwinklig gebogene Rohrstutzen (3); durch diese strömte der Dampf ins Freie und brachte dabei durch Rückstoß die Kugel zum Drehen (im Bilde rechts herum). Der Rückstoß wirkte nur auf die Biegestelle der Stutzen, war also sehr klein. Der Wert dieses Maschinchens lag auch nicht darin, daß es Arbeit verrichtete, sondern daß es zum erstenmal das physikalische Prinzip des Rückstoßes anschaulich und überzeugend zeigte.

Newton hat vermutlich den Dampfkreisler gekannt, als er seinen Rückstoß-Kraftwagen mit Dampf entwarf. Im 13. Jahrhundert haben die Chinesen das Pulver erfunden. Es brannte zwar recht langsam ab, genügte jedoch zum Antrieb leichter Raketen. Durch diesen Raketenantrieb wurden die Chinesen bald Meister in der Feuerwerkerei. Sie haben diese Kunst bald auch für Kriegszwecke ausgenutzt; sie füllten hinten offene Papphülsen mit Pulver, banden sie an einen Pfeil und ließen diese feuerspeienden Raketen 1232 auf das anstürmende mongolische Reiterheer los. Auf diese Weise errangen sie den Sieg. Viele Armeen haben dann im Laufe der Jahrhunderte die Rakete als Waffe benutzt; aus dem letzten Weltkrieg sind die V 1 und V 2 bekannt, ferner Nebelwerfer, „Katjuschas“ und andere Waffen.

Anwendung der Physik für kriegerische Zwecke, für Vernichtung, Überfall, aber auch für die Verteidigung – immer wieder sind die physikalischen Erkenntnisse für diese Zwecke eingesetzt worden. Aber das Rückstoßprinzip hat auch friedliche Dinge gefördert – beispielsweise bei der Rettung von Menschen aus Seenot; Raketen schießen die rettende Leine über die Brandung.

Die neuzeitliche Entwicklung der Rakete wurde 1900 durch K. E. Ziolkowski (Rußland) theoretisch begründet und 1910 durch Hermann Oberth (Deutschland) und Goddard (USA) praktisch begonnen; am 4. Oktober 1957 startete die Sowjetunion den ersten von Menschenhand geschaffenen Erdtrabant, den Sputnik I, dem inzwischen schon interplanetare Stationen, bemannte Raumschiffe und Planetensonden gefolgt sind. In der Luftfahrt sind Rückstoßantriebe selbstverständlich geworden – als reine Strahltriebwerke und als Propellerturbinen. Welch eine Entwicklung in wenigen Jahrzehnten! Der Mensch arbeitet ernsthaft an der Aufgabe, andere Planeten zu besuchen. Und alle Pläne solcher Art benutzen die Rückstoßkraft;



Heron
Dampfmaschine

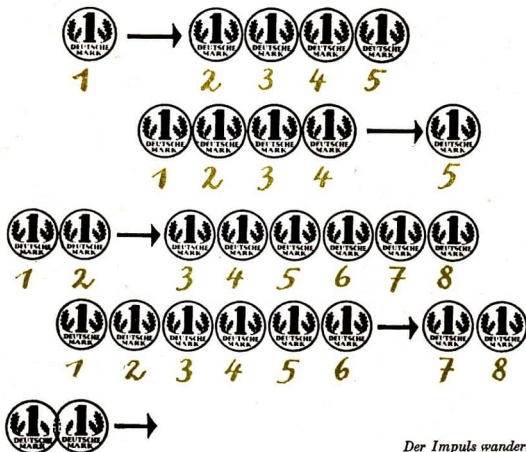
sie allein kann die hohen Geschwindigkeiten erzeugen, die nötig sind, um sich aus dem Schwerfeld der Erde zu lösen; und sie allein wirkt auch im luftleeren Raum.

Leider ist es schwierig (und kostspielig), die hohe Geschwindigkeit zu erreichen, denn der *Impulssatz* sagt aus: Das Produkt aus der Masse und der Geschwindigkeit der ausströmenden Gase ist ebenso groß wie das Produkt aus der Masse der Rakete und ihrer (durch den Rückstoß erhaltenen) Geschwindigkeit. Wer bedenkt, wie groß die Masse der Rakete gegenüber der Masse der leichten ausgestoßenen Gase ist, der kann sich leicht ausmalen, wie riesengroß deren Geschwindigkeit sein muß, um die schwere Rakete ausreichend schnell zu bewegen.

Von „Impuls“ ist hier die Rede gewesen. Das Wort kommt vom lateinischen *impellere* = antreiben. Im soeben genannten Satz bedeutet Impuls das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit. Der Physiker versteht unter Impuls meist das Produkt aus Kraft und Zeit (Dauer der Kraftwirkung), außerdem einen kurzzeitigen, stoßartigen Vorgang.

Stafettenlauf mit der Energie

Lassen wir eine Kraft nur kurze Zeit auf einen Körper wirken, so sprechen wir von einem Stoß. Der Physiker sagt dazu *Kraftstoß* oder *Impuls* und erklärt ihn als das Produkt aus einer Kraft und deren (sehr kurzer) Wirkungszeit. Newton hatte das schon erkannt. Wird ein beweglicher



Der Impuls wandert

Körper kurz und heftig angestoßen, dann saust er so schnell los, daß wir seine Beschleunigung (sein „Anfahren“) überhaupt nicht beobachten können. Er hat die zugeführte Bewegungsenergie blitzartig dem stoßenden Körper abgenommen und trägt sie nun weiter – wie ein Stafettenläufer den Stab.

Der Körper, der die Energie abgegeben hat, wird entsprechend ärmer an Energie. Haben beide Körper gleich große Massen, so übernimmt der gestoßene Körper alle Energie und bewegt sich mit der bisherigen Geschwindigkeit des stoßenden Körpers fort; dieser bleibt – nun ohne Bewegungsenergie – stehen. Ist die Masse des gestoßenen Körpers größer, so bewegt er sich ebenfalls, aber um so viel langsamer, wie seine Masse die des stoßenden Körpers überwiegt. Ist die gestoßene Masse kleiner als die stoßende, so wird sie sich schneller als diese bewegen. Das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit bleibt bei jedem Stoß gleich, sagt der Impulssatz. (Die Reibung lassen wir bei diesen Gedankenexperimenten aus dem Spiel.)

Wir können diesen Impulssatz beweisen mit verschiedenen großen Stahlkugeln, die zwischen langen Linealen laufen, oder – besonders einfach – mit Hartgeld. Wir sparen daher eine Zeitlang unser Taschengeld und wechseln es in Stücke zu 1, 5 und 10 Pfennig und 1 Mark. Auf einer glatten Unterlage stoßen wir eine Mark auf eine zweite. Die zweite setzt den Lauf der ersten fort; die erste bleibt liegen. Die zweite rutscht übrigens so weit, wie die erste es getan hätte, wenn ihr die zweite nicht in die Quere gekommen wäre. Wer das genau feststellen will, kann sich aus einem Röhrchen, einem Kolben und einer Druck-Wendelfeder eine Art kleiner Kanone bauen, mit der er die Geldstücke „abschießt“, und womöglich noch eine eingölte glatte Metallfläche verwenden.

Man kann die Beobachtungen freilich auch ohne Kanone deutlich genug machen, wenn man die Geldstücke mit einem Finger mit möglichst gleicher Kraft anstößt. Wir schicken zwei 1-Mark-Stücke gegen zwei andere (alle in einer Reihe!); das gleiche Ergebnis wie beim vorigen Versuch. Die beiden Massen, die stoßende und die gestoßene, sind gleich groß; daher gleitet die angestoßene mit der Geschwindigkeit der stoßenden weiter. Das kann man auch mit 3 und 3 Stücken und so fort bestätigen.

Jetzt legen wir drei oder vier Geldstücke in eine Reihe und lassen ein einziges (gleiches) Geldstück dagegenstoßen. Das Ergebnis verblüfft auch den klugen Menschen stets von neuem, weil es so zuverlässig auftritt: Das stoßende Stück (1) bleibt vor der Reihe liegen, und das äußerste (5) am anderen Ende der Reihe gleitet fort – offensichtlich mit der übertragenen Bewegungsenergie des stoßenden Stückes (1). Die anderen, (2), (3) und (4), sind scheinbar unbeteiligt liegengeblieben. Nur scheinbar; in Wirklichkeit haben sie als Wirkungslinie die Energie weitergeleitet. Als die Energie die passende Masse – ebenso groß wie die stoßende – im Stück (5) gefunden hatte, fuhr sie in dieses gewissermaßen hinein, und das Stück (5) rutschte los. In Wirklichkeit wird die Energie mit Hilfe der Elastizität der Körper übertragen. Sehen kann man das nicht, aber es ist so: Durch den Stoß werden beide Geldstücke zunächst an der Stoßstelle zusammengedrückt; die Energie hat sich in eine Formänderung (Verformung) verwandelt. Bei

weichen, unelastischen Körpern entstände jetzt Wärme durch die innere Reibung (der Moleküle aneinander), und die Verformung bliebe bestehen. Wir können das mit Scheibchen aus weichem Blei prüfen. Unser Münzmetall ist aber elastisch; die eingedrückten Stellen schnellen sofort wieder vor, und das nächste Geldstück ist an der Reihe. Selbstverständlich geht dabei immer etwas Energie durch die Reibung verloren; das läßt sich nicht vermeiden, denn die Moleküle können wir nicht schmieren.

Wir legen nun sechs Geldstücke in eine Reihe und stoßen sie mit zwei gleichen Stücken an. Erfolg: Am anderen Ende gleiten die beiden letzten fort. Dieser Versuch läßt sich in beliebigen Variationen fortsetzen. Immer kommt so viel heraus, wie wir hineingesteckt haben – nicht mehr und (von den Reibungsverlusten abgesehen) nicht weniger.

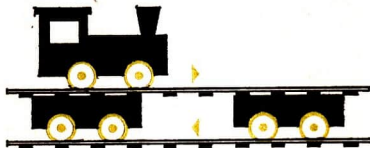
Was geschieht, wenn wir verschieden große Massen aufeinanderstoßen lassen, beispielsweise ein 1-Mark-Stück auf ein 10-Pfennig-Stück? Das große Stück bleibt meist liegen, und das kleine gleitet mit sichtbar größerer Geschwindigkeit fort. Impulssatz! Der umgekehrte Vorgang ist auch zu beobachten.

Besonders schnell läuft ein 1-Pfennig-Stück vor dem 1-Mark-Stück davon. Wenn umgekehrt das kleine das große Stück anrenpelt, dann bewegt sich das große nur wenig und langsam vorwärts, denn der Pfennig wird seine Energie nicht ganz los: Er springt meist mit einem Teil der Energie zurück. Die andere Masse ist im Verhältnis gar zu groß und zu träge. Das ist im Leben genauso – wenn ein laufendes Kind unachtsam auf einen großen Erwachsenen prallt. Lokomotivführer müssen beim Rangieren den Kraftstoß, das heißt Kraft und ihre Wirkungszeit (Schubkraft und Schubzeit) danach bemessen, wie groß die Masse der Wagen ist und wie hoch deren Geschwindigkeit sein soll.

Die physikalische Modelleisenbahn

Wir stecken einige gerade Schienen zusammen und legen sie auf leichtfahrende Wagen, die auf einer glatten Fläche – oder ebenfalls auf Schienen, sozusagen ein Stockwerk tiefer, laufen. Die Lokomotive oder der Schienenbus wird auf das eine Ende der (oberen) Schiene gestellt. Er fährt jetzt zum anderen Schienenende, und die Schiene bewegt sich mit den Wagen nach

Versuch zum Reaktionsprinzip



der anderen Richtung. Wer dabei im Verhältnis zum ruhenden Tisch oder Fußboden die längere Strecke zurücklegt, hängt vom Verhältnis der Massen Lokomotive zu Schienen mit Wagen ab. Halten wir die Lokomotive fest, dann fahren nur die Schienen; verkehrte Welt!

Wir sehen und erleben, daß die Schiene einen Kraftstoß (Impuls) erhält. Und wenn wir die Schiene unmittelbar auf den festen Tisch oder Fußboden stellen – wer empfängt dann den Stoß? Die ganze Erde! Schwellen und Pflaster übertragen ihn im Verkehr der Fahrzeuge. Das muß man beim Bau der Gleise und Straßen sorgfältig beachten.

Wir haben an diesem Versuch das physikalische Prinzip der Fortbewegung der Fahrzeuge auf der Erde, im Wasser und in der Luft dargestellt.

Wasser hat eine Haut

Der Wasserhahn tropft! Das ist ärgerlich; wahrscheinlich hat wieder jemand den Hahn fester als unbedingt nötig mit roher Kraft zugedreht und dabei den Dichtungsring so stark zusammengedrückt, daß er seine Elastizität verloren hat und nun nicht mehr sauber abdichten kann. Halt — ehe wir einen neuen Ring einsetzen, wollen wir aus der Not eine Tugend machen und Physik selbst erleben!

Es ist schon bemerkenswert: Zunächst bildet sich eine Art Sack, und in diesen fließt Wasser hinein. Man sieht, wie das Gewicht des Wassers so groß wird, daß der „Sack“ sich einsnürt. In der folgenden Abbildung hat er schon Kugelform angenommen.

Wir erinnern uns des auf Seite 24 beschriebenen Versuches, bei dem wir einen Wassertropfen durch Öl fallen ließen. Der Tropfen war ganz rund. Wir schließen daraus, daß der Tropfen eine richtige Haut — Grenzfläche, sagt der Physiker — hat, die das Wasser drinnen zusammendrückt. Da der Körper, der bei gegebenem Inhalt die kleinste Oberfläche hat, eine Kugel ist, versucht die Flüssigkeit sich stets (ganz oder teilweise, soweit wie möglich) als Kugel „einzugeln“. Aus diesem Grunde können wir (vorsichtig) mehr Wasser in ein Gefäß tun, als dieses eigentlich fassen kann; das Wasser wölbt sich oberhalb des Gefäßrandes. Je näher die Flüssigkeit dem Erdmittelpunkt ist, um so stärker ist die Krümmung der Oberfläche; im Erdmittelpunkt würde sie eine Halbkugel bilden.

Aus demselben Grund versucht eine Seifenblase, die noch am Pusteröhrchen hängt, so klein wie möglich zu werden. Auch diese Haut drückt nach innen. Diese Druckkräfte können beachtlich groß werden, in sehr kleinen Tropfen beispielsweise viele kp/cm^2 (at). Eine seltsame Angelegenheit: innen Wasser, das unter Druck gesetzt wird, und außen eine äußerst dünne Schicht, ebenfalls aus Wasser — aber dieses benimmt sich völlig anders; es drückt nach innen wie eine Gummimembran. Die Oberfläche des Wassers spannt sich; wir nennen diese Erscheinung daher *Oberflächenspannung*.

Von der Oberflächenspannung

Da wir die Massenanziehung und allerlei Kräfte kennen, läßt sich die Erscheinung leicht erklären. Jede Flüssigkeit besteht (wie jeder Körper) aus Molekülen; ein Wassermolekül setzt sich wiederum aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff zusammen (H_2O). Die Massenanziehung wirkt auch bei Molekülen; sie ziehen einander an.

Im unteren Teil der untersten Abbildung ist ein Normalfall gezeichnet: Jedes Molekül (als Kreis angedeutet) ist von anderen umgeben. Das Molekül in der Mitte wird also von allen Seiten gleichmäßig angezogen und bewegt sich bei niedriger Temperatur – anders als die frei umherschwirrenden Gasmoleküle – nur wenig. Alle Kräfte heben einander auf. So sieht es überall in der Flüssigkeit aus. Ganz anders an der Oberfläche, in der Grenzschicht! Sie ist nur „ein Molekül dick“, das heißt unvorstellbar dünn. Die Moleküle der Grenzschicht drängen scheinbar die inneren zurück wie Platzwarte, die ein Fußballstadion gegen eine andrängende Menge absperren. Sie werden ja nur von innen angezogen, nicht aber von außen. Außerhalb der Flüssigkeit ist das Gas, meist Luft, mit (im Verhältnis) so wenigen Gasmolekülen, daß sich die Grenzflächen-Moleküle nicht wesentlich davon angezogen fühlen. Insofern hinkt der Vergleich mit der Absperrung sehr. Schuld an der Bedrängnis der inneren Wassermoleküle sind diese selber oder besser: die Naturgesetze. *Die Oberflächenspannung bildet eine Grenzfläche (Haut); diese sorgt durch den „Druck nach innen“ dafür, daß die umspannte Flüssigkeit soweit wie möglich Kugelgestalt annimmt.* Durch dieses Naturgesetz erklären sich die Form der Regen- und Nebeltropfen, das Aufsteigen von Flüssigkeiten in sehr engen Röhrchen (Kapillaren, von lateinisch capillus = Haar; Pflanzensäfte steigen so in den Pflanzen und Bäumen auf!); ferner die Wölbung (Meniskus) von Flüssigkeitsspiegeln, die Schmierwirkung von Ölen und Fetten in Lagern und anderes mehr. Auch daß das Wasser den Schmutz in Geweben und auf festen Flächen nicht so leicht löst, findet hier seine Ursache; das Wasser ist sozusagen nicht flüssig genug, um unter den Schmutz zu gelangen und ihn abzuheben. Die kleinen „Wasserläufer“ laufen mit ihren behaarten Beinen vergnügt auf dem Wasser hin und her; man sieht, wie sich die Oberfläche unter den Füßchen ein wenig einbeult. Die Tiere haben auch an den Füßen Härchen, in denen sich ein Luftpolster hält; das verhindert zusätzlich eine Benetzung.



Wir messen die Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung äußert sich durch eine Kraft (schon wieder eine!), und wir können diese in Pond messen. Die Einheit der Oberflächenspannung ist die Kraft, mit der sich ein Oberflächenstreifen von 1 cm Breite zu verkürzen sucht (p/cm). Wir hängen einen sauberen, fettfreien, glatten Metallring an einem Zugkraftmesser auf (Meßbereich etwa 100 p) und lassen ihn gerade die Wasseroberfläche berühren. Hier haftet der Ring sofort durch die *Adhäsionskraft* (vom lateinischen adhaerere = aneinander-

Ein Tropfen entsteht

hängen). Wenn es diese Molekularkraft nicht gäbe, könnten wir nicht malen und schreiben und nichts benetzen! Jetzt ziehen wir das Meßgerät langsam hoch – in der Abbildung auf Seite 105 mit Hilfe einer kleinen Haspel – und beobachten die Belastung. Wenn der Ring von der Wasseroberfläche abreißt, haben wir die gesuchte Kraft in p. Die Haftkraft (Adhäsionskraft) zwischen Wasser und Metall ist größer als die Kraft zwischen den Wasserteilchen untereinander; wenn der Ring abreißt, so geschieht das also tatsächlich, weil hier die Grenze der Spannung, des Zusammenhanges zwischen den Oberflächenmolekülen (Kohäsionskraft), überschritten wurde.

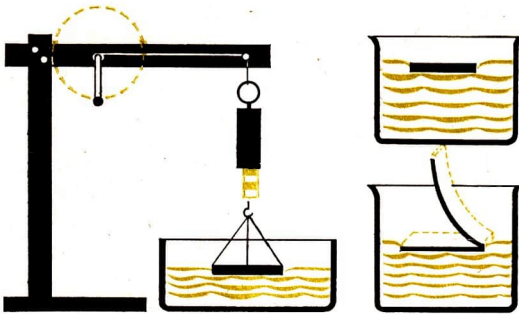
Der Wert der Oberflächenspannung ist bei jeder Flüssigkeit anders, bei Äther nur 0,22, bei Alkohol 0,3, bei Olivenöl 0,5 des Wertes bei Wasser. Bei Glycerin liegt er um etwa 10% niedriger. Das kann jeder selbst prüfen. Dabei können wir an Stelle des Metallringes einen Drahttring und statt des Zugkraftmessers auch eine Balkenwaage benutzen. Wichtig ist, daß der Ring beispielsweise mit Benzin entfettet ist. Andernfalls haftet er nicht am Wasser, weil er nicht benetzt wird.

Gewicht gegen Oberflächenspannung

Merkwürdig: Man kann Metall auf Wasser schwimmen lassen! Nähnadel, Rasierklinge, Drahttring, kleine Geldstücke – alles schwimmt, wenn man es vorher gut abtrocknet und dann durch Bestreichen mit dem Finger ein wenig anfettet. Man sieht die tiefe Einbeulung im Wasser; aber die Molekularkräfte halten dem Gewicht stand. Dabei ist nach dem Gesetz $actio = reactio$ die Oberflächenspannung in jedem Fall gleich dem Gewicht des Schwimmers. Wir müssen dieses „Schwimmen“ von dem eines Schiffes unterscheiden, das nach dem Archimedischen Prinzip des Auftriebs im Wasser „richtig“ schwimmt. Die Rasierklinge kann man sogar noch mit einer Masse von etwa 0,5 g (Büroklammer oder Geldstück) beschweren; diese Tragkraft ist auf die verhältnismäßig große Fläche der Klinge zurückzuführen. Auch dünnes Aluminiumblech schwimmt gut, ebenso ein engmaschiges paraffiniertes Drahtnetz; man muß nur alle diese Teile genau waagerecht und langsam auflegen. Wenn das schwerfällt, der mag auf das Wasser erst ein Stückchen Löschpapier legen und darauf das Metallstück. Das Papier saugt sich schnell voll und sinkt dann unter. Auch ein kleiner Drahttring mit einem Griff kann gute Dienste leisten.

Die Schwimmer lassen sich mit einiger Phantasie als Segelschiffchen oder mit Wimpel bauen. Die Abbildung rechts oben zeigt, wie man ein dünnes Blech als Schwimmer biegen kann. Der Schwerpunkt des Gebildes muß genau über der Mitte des waagerechten Blechstückes liegen; andernfalls gleitet das Schiffchen an der stärker belasteten Seite „in die Tiefe“. Weitgehend belastbar (bis 20 p) ist ein Körbchen aus feinmaschigem Drahtnetz (Gaze) von etwa 4 cm mal 8 cm Bodenfläche und mit einem etwa 1 cm hohen Rand.

Wir füllen unsere Pipette (siehe Seite 24) mit gefärbtem Anilin, berühren mit ihrer Öffnung gerade eben die Wasseroberfläche und lassen ganz langsam



Versuche zur Oberflächenspannung

und vorsichtig das Anilin ausfließen. Zunächst bildet sich ein kreisförmiger Anilinfleck auf dem Wasser; er wölbt sich bei Zufließen von weiterem Anilin sackförmig nach unten, schnürt sich ein und wird zum Tropfen. Dieser wächst so lange, bis sein Gewicht größer als die Oberflächenspannung des Wassers ist; dann reißt er ab und sinkt zu Boden.

Der schwimmende Kompaß

Ein sehr dünnes Stahlband oder eine Rasierklinge oder auch die Hälfte einer in der Längsrichtung durchgebrochenen Rasierklinge wird durch Bestreichen mit einem kräftigen Magneten magnetisiert (die eine Hälfte mit dem Nordpol, die andere mit dem Südpol bestreichen). Sobald das Stahlstückchen auf dem Wasser schwimmt, stellt es sich, wie es sich für eine Kompaßnadel gehört, in der Nord-Süd-Richtung ein. Es kann durch einen Magneten von außen (Abstand halten!) leicht bewegt werden.

Anziehung und Abstoßung

Wir füllen ein trockenes Glas übertoll mit Wasser, so daß eine Wölbung (Meniskus) entsteht; man kann die Wölbung verstärken, indem man Blechstückchen mit einer Kante in das Wasser gleiten läßt. Kleine Schwimmer, etwa 1-Pfennig-Stücke, streben zum Rand.

Wir gießen etwas Wasser aus oder saugen es ab. Die Schwimmer sammeln sich jetzt, dicht aneinandergedrängt, in der Mitte der runden, flachen Wasserfläche. Wir tauchen in einigen Millimetern Entfernung einen Bleistift langsam etwa 1 cm tief ins Wasser. Die Schwimmer werden vom Bleistift angezogen. Wir ziehen den Stift langsam wieder aus dem Wasser heraus –

die Schwimmer werden abgestoßen; man kann sie bis an den Glasrand drängen.

Warum? Gleiche Wölbungen ziehen einander an, ungleiche stoßen einander ab. Der Schwimmer erzeugt im Wasser eine Wölbung nach unten; der Stift tut bei seiner Bewegung in das Wasser hinein das gleiche. Wird der Stift herausgezogen, geht die Wölbung nach oben – wir haben die Abstoßung.

Aus dünnem, nicht geleimtem Papier (beispielsweise Seidenpapier) von 17 cm mal 3 cm Größe falten wir ein rechteckiges Kästchen, 15 cm lang, 1 cm breit und 1 cm hoch. Wir befeuchten es innen gehörig mit einem Pinsel und gießen dann 4 bis 5 mm hoch Wasser hinein. Die Oberflächenspannung zieht die oberen Ränder der langen Seiten zusammen, bis sie einander berühren.



Auftrieb gegen Oberflächenspannung

Die Moleküle der Grenzfläche halten gut zusammen – nicht nur gegen Drücke von oben, sondern auch gegen solche von unten. Wir wollen das beweisen.

Ein dünner Ring von etwa 8 cm Durchmesser aus dünnem Draht wird mit zwei oder drei weiteren Drahtstücken auf einem Kork befestigt. Unten erhält der Kork eine kleine Last – so groß, daß der Ring des Schwimmers 8 bis 10 mm den Wasserspiegel überragt.

Die ganze Einrichtung schwimmt jetzt (im Gegensatz zu den vorher behandelten Schwimmern) „richtig“, das heißt durch ihren Auftrieb im Wasser. Drücken wir den Schwimmer unter Wasser, so versucht er, seinen alten Platz wieder einzunehmen. Das gelingt aber nicht – die Oberflächenspannung des Wassers hält ihn zurück; sie wirkt mit der gleich großen Gegenkraft abwärts wie der Auftrieb aufwärts. Die Dehnung (gewölbte Kuppe) der Wasseroberfläche ist deutlich zu sehen.

Der Ring muß sehr genau in einer Fläche liegen, damit er an allen Stellen gleichmäßig an die Grenzfläche stößt. Wir fetten ihn mit den Fingern ein wenig ein.



Die zugkräftige Seifenhaut

Die dünne Haut einer Seifenblase ist praktisch eine (doppelte) Grenzfläche. Die Moleküle ziehen einander nur an den Seiten an; infolgedessen versucht die Seifenhaut, eine möglichst kleine Fläche zu bilden, sich also zusammenzuziehen. Wir kennen das von den gewöhnlichen Seifenblasen her. Wenn man eine große Seifenblase bläst, das Blaströhrchen aus dem Mund nimmt und die Öffnung des Röhrchens an eine Kerzenflamme hält, so kann man diese mit der Druckluft ausblasen, die aus der sich verkleinernden Blase stammt. Dieses Zusammenziehen der Seifenhaut ist auch auf die Oberflächenspannung zurückzuführen. Das ist also ähnlich wie bei den Oberflächen

der Flüssigkeiten, nur daß bei der Seifenhaut kein Druck auf eine Flüssigkeit ausgeübt wird, denn die gibt es in diesem Fall nicht.

Der belgische Physiker I. A. F. Plateau (1801 bis 1883) bastelte sich als erster stereometrische Figuren aus Draht: Kegel, Prismen, Würfel, Wendeln und andere mehr.

Die Seifenhaut bildet zwischen diesen Kanten „Mindestflächen“ von oft verblüffender Schönheit. Die Mathematiker sind durch die Versuche Plateaus zu besonderen Überlegungen in der Differentialgeometrie angeregt worden. Die Flächen sind so wunderschön gleichmäßig, weil die Oberflächenspannung erheblich größer als das Gewicht ist; dieses verändert die Form nicht. Man könnte sagen: „Das Gewicht fällt hier nicht ins Gewicht!“ Wir wollen uns diese schönen Versuche natürlich nicht entgehen lassen und fertigen uns einige Drahtgebilde an, zunächst einen Ring mit Griff, dann schwierigere Dinge – ganz nach Geometrie und nach freier Phantasie. Dann stellen wir eine gute Seifenlösung mit destilliertem oder zumindest abgekochtem Wasser und Seifenflocken (oder Kernseife) her.

Die eilenden Seifenhäutchen

Als erstes benetzen wir einen Glastrichter innen mit der Seifenlösung; dann tauchen wir sein weites Ende in die Lösung und ziehen es vorsichtig wieder heraus. Die große Trichteröffnung ist nun mit einem Seifenhäutchen verschlossen. Jetzt halten wir den Trichter waagerecht – und das Häutchen läuft bis zum engen Ende des Trichters. Erzeugt man mehrere Häutchen schnell nacheinander, so laufen sie hintereinander her.

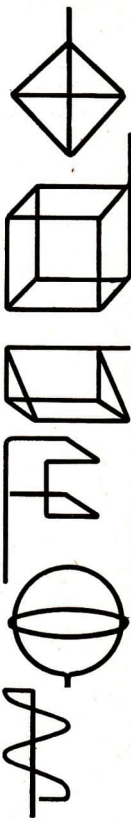
Der gezogene Faden

Wir biegen ein Drahtrechteck mit Griff und binden aus einem Seidenfaden eine kleine Schlaufe. Das Rechteck wird (durch Eintauchen in die Lösung) mit einer Seifenhaut überzogen; der geschlossene Seidenfaden wird auf die Haut gelegt. Dort bleibt er liegen, bis wir mit einem trockenen Stift oder Finger das Häutchen innerhalb des Fadens durchstoßen. Sofort rundet sich der Seidenfaden, von der Seifenhaut gleichmäßig gezogen, zu einem Kreis ab.

Man kann auch einen Faden locker an zwei Seiten des Rechteckes oder eines Drahttringes anbinden, ein Häutchen über dem Ganzen herstellen und dann eine Seite durchstoßen. Die Gleichmäßigkeit der Linien und Flächen erfreut immer wieder.

Wir erzeugen Mindestflächen

Nun tauchen wir unsere räumlichen Drahtgebilde in die Seifenlösung und beobachten die entstehenden Mindestflächen.



Das romanische Fenster

Aus zwei waagerechten, etwa 15 cm langen, dünnen Holzstäben (notfalls Stricknadeln) und zwei senkrechten Seidenfäden stellt man einen Rahmen her; der obere Stab erhält einen Haltefaden. Etwa in halber Höhe wird ein lockerer Querfaden befestigt, der in der Mitte einen weiteren Faden trägt. Den weiteren Verlauf zeigt der untere Teil der Abbildung auf dieser Seite.

An diesem Versuch ist eines besonders wichtig: Wir können die Zugkraft in p messen, mit der wir die „Zusammenziehkraft“ der Seifenhaut überwinden. Noch besser geht das mit der auf Seite 109 gezeigten Anordnung. Wir biegen aus dickerem Draht ein großes U mit einem Griff an dem einen Schenkel. Ein leichter Querdraht wird mit Ösen so angebracht, daß er sich leicht an den Schenkeln auf und ab bewegen läßt; er trägt in der Mitte einen Faden. Der Querdraht wird etwa in halber Schenkelhöhe festgehalten; dann wird die Seifenhaut hergestellt. Durch Ziehen am Faden über einen empfindlichen Zugkraftmesser können wir die Zugkraft der Haut messen; wir können auch (bei senkrechter Anordnung) Wägestücke anhängen.

Waschen – leicht gemacht durch die Physik

Wenn sich das Wasser bei jeder Gelegenheit gegen andere Dinge so gern durch seine Oberflächenspannung absperrt, dann kommt es auch nicht recht an den Schmutz heran, der an Textilien und anderen festen Körpern haftet. Wir sagen besser: Das Wasser kommt nicht *unter* den Schmutz, soll ihn aber von der Unterlage abheben. So angenehm und lebensnotwendig die Oberflächenspannung für alle Schwimmvögel ist, so störend macht sie sich beim Waschen jeder Art bemerkbar.

Was tat der einigermaßen kluge Mensch? Anstatt das Gewebe um so mehr zu schrubben (wie es der törichte Mensch tat) und damit mechanisch zu zerstören, *erhitzte* er das Waschwasser. Und siehe da: Der Schmutz löste sich schon besser. Wir überzeugen uns durch den Versuch.

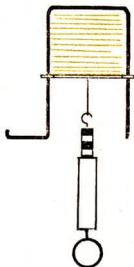
Oberflächenspannung bei heißem Wasser

Wir legen zunächst auf kaltes Wasser eine Rasierklinge, dann noch eine, zwei, drei und mehr darauf – bis der ganze Stapel untersinkt und wir die Größe der Oberflächenspannung festgestellt haben.

Anschließend erhitzen wir das Wasser auf etwa 95 °C, das heißt, wir bringen es zum Sieden, nehmen es von der Flamme und lassen es ruhig werden. Jetzt legen wir (Vorsicht! Heiß!) auf dieses heiße Wasser eine Klinge, noch eine – und schon sinkt alles in die Tiefe. *Die Größe der Oberflächenspannung ist also von der Temperatur der Flüssigkeit abhängig.* Warum?

Die Moleküle der Flüssigkeit bewegen sich dauernd hin und her. Die Abbildung auf Seite 103 gibt die Verhältnisse idealisiert und schematisch wieder; unsere Erkenntnisse von den Kräften sind zwar richtig, aber ganz

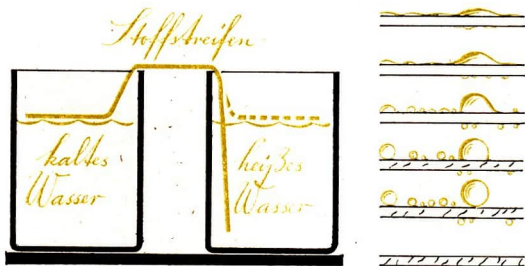
so brav und dicht nebeneinander liegen die Moleküle in Wirklichkeit nicht. Je wärmer eine Flüssigkeit ist, um so stärker bewegen sich die Moleküle; die Kohäsion (Zusammenhangskraft) wird schwächer. Schließlich hört die Kohäsion auf, die Moleküle fliegen als Wasserdampf munter in die Gegend – das Wasser siedet. (Der Abschnitt von der Wärme bringt darüber mehr.) Es ist leicht zu verstehen, daß bei immer schwächer werdender Kohäsion auch die Oberflächenspannung abnimmt; wenn alles unter ihnen umhertobt, können die Grenzflächenmoleküle nicht in Ruhe bleiben. Sie toben mit, und das Wasser wird entspannt. Da wir wissen, wie man die Größe der Oberflächenspannung mißt (beispielsweise mit dem Ring), können wir sogar von 20 zu 20 °C ihre Abhängigkeit von der Temperatur messen und aus den Werten eine Kurve zeichnen.



Ein Versuch für Zweifler

Wer es noch nicht glaubt, mag folgenden Versuch machen: Wir stellen zwei gleich große Gläser nebeneinander und füllen das eine mit kaltem, das andere mit sehr heißem Wasser gleich hoch. Einen in der Mitte quergefalteten Stoffstreifen, 1 cm breit, legen wir so über die aneinanderstehenden Glasränder, daß auf beide Wasseroberflächen gleich lange Streifenenden fallen. Ergebnis: Das Streifenende auf dem heißen Wasser sinkt wesentlich schneller ein als das andere; das entspannte heiße Wasser schlüpft leichter in das Gewebe (im Ernstfall unter den Schmutz). Ob es noch andere Möglichkeiten gibt, Wasser zu entspannen?

Die durch die Seifenhaut auftretende Kraft wird gemessen



Heißes Wasser ist oberflächenaktiv – und der Schmutz „rollt ab“

Alkohol kämpft mit Kaffee

Wir gießen auf eine umgekehrte Untertasse ein wenig Kaffee, so daß der Boden gerade bedeckt ist. Dann geben wir einige Tropfen Rum (oder ein anderes starkes alkoholisches Getränk) in die Mitte. Und nun geht der

Kampf los, wie er erbitterter nicht zwischen Freunden und Gegnern des Alkohols geführt werden kann:

Der Alkohol (mit der kleineren Oberflächenspannung) drängt den Kaffee an den Rand; die Mitte wird fast trocken und der Boden sichtbar. Erst allmählich beruhigen sich beide Flüssigkeiten und bilden ein friedliches Gemisch, das sich wieder über der Mitte schließt. Ein solcher „Kampf“ entsteht immer, wenn zwei *Flüssigkeiten mit verschiedenen großen Oberflächenspannungen* zusammentreffen. Die Flüssigkeit mit der kleineren Oberflächenspannung will eine größere Fläche einnehmen. Das führt zu Bewegungen der Flüssigkeitsmoleküle, und übrig bleibt eine Mischung mit geringerer Oberflächenspannung, als sie das Wasser vorher hatte. Das wollen wir aber gerade, denn dadurch wird – wie schon gesagt – jedes Waschen leichter und wirtschaftlicher.

Das gilt auch für das *Beseitigen eines Fettflecks durch Benzin*. Man tropft rings um den Fleck Benzin, ohne ihn selber anzufeuchten; erst dann kommt der Tropfen (oder mehrere) auf den Fleck. Jetzt wird mit einem Stück Tuch aus der Mitte abgetupft – dort ist das fetthaltige Benzin (mit der höheren Oberflächenspannung) vom umgebenden reinen (mit der kleineren Spannung) zusammengedrängt! Tropft man zuerst auf den Fettfleck, so wird das fetthaltige Benzin von den folgenden Tropfen verdrängt, und es bildet sich der bekannte unerfreuliche Rand.

Die Sache mit dem Benetzen

Daß unsere kleinen Schwimmer auf der Wasseroberfläche schwammen, liegt – das wissen wir – an der Oberflächenspannung. Ein wenig geholfen hat dabei, daß wir die Dinge durch die Finger zogen und dadurch ein wenig einfetteten; beim Versuch mit dem Sieb haben wir das sogar gründlich getan. Auch die Schwimmvögel sind von Natur aus mit einem gut eingefetteten Gefieder ausgestattet; dadurch werden sie nicht *benetzt*, das heißt, sie werden überhaupt nicht naß. Auf diese Weise – durch die „Feindschaft“ zwischen Fett und Wasser – bleibt die Grenzfläche des Wassers mit ihrer wirksamen Oberflächenspannung im wesentlichen erhalten. Eine völlig trockene Nadel geht meist sofort unter, weil sie benetzt wird, dadurch die Wasserhaut durchbricht und durch die so entstandene Lücke rutscht.

Der Gedanke lag nahe, nach Mitteln zu suchen, die die starke Oberflächenspannung des Wassers herabsetzen, das Wasser gewissermaßen flüssiger machen können, so daß es auch die Schmutzteile (sogar die fettigen) benetzt, „unterwandert“ und anhebt; dann wären die Teilchen leicht fortzu spülen. Der Kampf des Alkohols mit dem Kaffee, dessen Oberfläche aufgerissen wurde, zeigt den Weg: Man fand gute und billige Stoffe (Rum wäre ja zu teuer!), mit denen man die Oberflächenspannung des Wassers tatsächlich stark herabsetzen kann – die *oberflächenaktiven Stoffe* oder *Netzmittel*, beispielsweise Fewa. Eine Gans, in Fewa-Wasser gesetzt, geht unter.



Noch einmal: Der Stofftest

Wir bauen unsere beiden Gläser vom Versuch auf Seite 109 wieder auf, füllen aber das eine Glas nicht mit heißem, sondern mit kaltem Wasser, dem etwas Fehwalsung beigegeben wurde. Der Stoffstreifen sinkt in dieses Wasser schneller als in das reine Wasser.

Das „schnelle“ Fewa

Ein Tropfen Fewa-Wasser sickert in einen Stoff schneller ein als ein Tropfen reinen Wassers; das läßt sich schnell nachprüfen. Derartige Versuche lassen sich viele durchführen, beispielsweise können wir gleich große Papierstückchen derselben Sorte auf das Wasser in den beiden Gläsern legen.

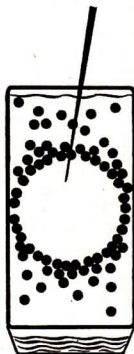
Wir tauchen auch einmal einen Teller in gewöhnliches Wasser und einen zweiten in Wasser mit einem Spülmittel und lassen von beiden das Wasser ablaufen (Spülvorgang). Auf dem ersten Teller bilden sich mehrere ungleichmäßige „Inseln“ aus Wasser, die nicht miteinander zusammenhängen; auf dem zweiten Teller bleibt eine wesentlich dünnere, gleichmäßige Wasserschicht, die schnell trocknet.

Die Explosion auf dem Wasser

Ein Stück Fett oder Seife oder ein Tropfen Äther, Öl, Benzin oder Spiritus, auf die Wasseroberfläche gebracht, reißt diese regelrecht auf; das läßt sich mit leichten Dingen, die auf dem Wasser schwimmen, fast noch schöner als durch den Kampf zwischen Alkohol und Kaffee zeigen.

Wir gießen in ein flaches Gefäß (Teller oder Fotoschale) reines Wasser und bedecken die Oberfläche möglichst gleichmäßig mit Konfetti (aus dem Bürolocher) oder sehr dünn mit Magnesia-Pulver, Schwefelblüte, Bärlappsporen oder einem fettfreien Puder (gewöhnlicher Körperpuder ist meist nicht geeignet). Die Spitze einer größeren Nadel oder das Ende eines Drahtes benetzen wir ein wenig mit einer der genannten Flüssigkeiten und tauchen sie mitten in die Wasserfläche. Das Ergebnis ist erstaunlich: Die schwimmenden Teilchen sausen nach allen Seiten auseinander. Noch stärker ist die Wirkung, wenn wir einen Tropfen der oberflächenaktiven Flüssigkeit auf das Wasser fallen lassen. Bei Öl sieht man besonders gut, wie es sich auf der Oberfläche ausbreitet und die alte Wasseroberfläche in einen immer größer werdenden *Spreitungskreis* zurückdrängt.

Bei der Rettung Schiffbrüchiger wird diese Erscheinung ausgenutzt, um die hochgehende See zu beruhigen: Man gießt Öl auf die Wellen. Wir verstehen jetzt auch das Rückstoßschiffchen (Seite 94), das mit Öl „betrieben“ wurde, völlig – wieso sich das Öl da „ausbreiten will“. Wir wissen jetzt, daß wir das Boot auch mit Seife, Spiritus, Äther oder einem anderen oberflächenaktiven Stoff betreiben können.



Die Explosion
auf dem Wasser

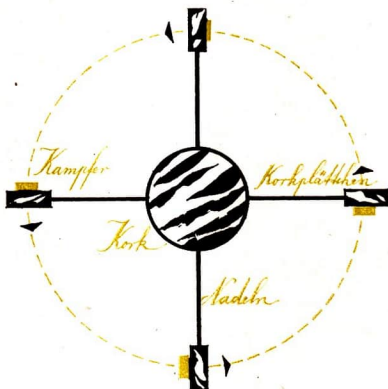
Die sich drehende Spirale

Wir biegen aus sehr dünnem Draht eine kleine Spirale, fetten sie etwas ein und setzen sie auf das Wasser. In die Mitte der Spirale bringen wir einen Tropfen von einer unserer oberflächenaktiven Flüssigkeiten – und die Spirale beginnt sich zu drehen. Auch hier liegt (wie bei dem Rückstoßschiffchen) ein Antrieb durch Rückstoß vor; da der sich ausdehnende Tropfen aber „krumme Wege“ gehen muß, zwischen den Windungen der Spirale hindurch nämlich, ergibt sich die Drehbewegung.

Die Kampferturbine

Kampfer ist eine weiße, körnige Masse von stechendem Geruch, den die Motten nicht vertragen; er wird daher zur Mottenbekämpfung und außerdem zur Herstellung von Zelluloid sowie in der Medizin als Mittel zum Anregen der Herztätigkeit verwendet. Zu 89 bis 94 Prozent besteht er aus Reinkampfer (einer organischen Verbindung, aus dem asiatischen Kampferbaum gewonnen) und zu 2 bis 2,5 Prozent aus ätherischem Kampferöl. Dieses Öl wird ständig abgesondert; es ist oberflächenaktiv, also für unsere Versuche geeignet.

Wir bauen aus einer großen und vier kleinen Korkscheiben sowie vier Nadeln eine Art Turbine. Die große Scheibe liegt flach, die kleinen sind senkrecht dazu angeordnet. An jede kleine Korkscheibe kleben wir mit Plastleim ein Stückchen Kampfer. Alles muß sorgfältig vor Fett geschützt werden; am besten mit Pinzette arbeiten! Sobald die Turbine auf das Wasser gesetzt ist; verändert das Öl, das aus den Kampferstückchen ent-



weicht, die Oberflächenspannung des Wassers, und die Turbine dreht sich stundenlang, unter Umständen tagelang. Ist das ein Rückstoßantrieb? Die Frage ist nicht leicht zu beantworten!
Auf ähnliche Weise kann man Schiffchen mit Kampferantrieb bauen.

Das erlöste Öl

Wir füllen ein kleines Medizinfläschchen (mit sehr engem Hals) mit irgendeinem Öl bis an den Rand und stellen es in ein hohes Glasgefäß, beispielsweise einen Standzylinder. Jetzt füllen wir langsam dieses Gefäß mit Wasser. Das erste Ergebnis: Das Öl möchte wohl nach oben, wohin es dank seiner geringeren Dichte und dem damit verbundenen Auftrieb auch gehört – aber es wird durch die Oberflächenspannung des darüberliegenden Wassers daran gehindert (ähnlich wie im Versuch auf Seite 106). Wir gießen ein wenig oberflächenaktive Flüssigkeit in das Wasser; das Öl entweicht an die Wasseroberfläche.

Die Luft hat auch Gewicht

„Im luftleeren Raum kann weder ein Licht brennen noch ein lebendes Wesen existieren. Die Luft ist körperliches Etwas, die Wärme dehnt sie aus, die Kälte zieht sie zusammen, sie läßt sich zusammendrücken, doch hat die Verdichtung ebenso eine Grenze wie die Verdünnung. Die Luft hat Gewicht und drückt sich selbst, sie drückt auf alles, sie nimmt Schall und Geruch auf, wie Feuchtigkeit und Dämpfe.“

Das schrieb Otto von Guericke (1602 bis 1686) während seiner Experimente, die er mit der Luft und dem Luftdruck machte. Hauptberuflich ist er Ratsherr und Bürgermeister von Magdeburg gewesen; das war ein schweres Amt, besonders während des Dreißigjährigen Krieges. Wenige Jahre nach Friedensschluß begann Guericke mit seinen Versuchen gegen die damals herrschende Vorstellung, ein luftleerer Raum sei etwas Schreckliches. „Horror vacui“, „Angst vor dem luftleeren Raum“ schrieb man sogar der Natur zu.

Guericke fand die Wahrheit und zeigte, daß es einen luftleeren Raum gibt, daß man ihn herstellen kann und wie man das macht und daß die Luft wie jeder Körper ein Gewicht hat. Das waren Entdeckungen von außerordentlich großer Tragweite, die auch damals schon Aufsehen erregten. Die wichtigste Erfindung Guericke's in diesem Zusammenhang war die Luftpumpe. Die ersten Modelle davon sind leider nicht erhalten geblieben; die älteste heute noch vorhandene Luftpumpe hat Guericke in den Jahren 1661 und 1662 gebaut.

Über 300 Jahre ist diese Pumpe heute alt! Sie diente zu Guericke's berühmtem Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln. Er pumpte, wie schon erwähnt, zusammengefügte Halbkugeln, soweit er konnte, luftleer und spannte vor jede Halbkugel acht Pferde. Diese sechzehn Pferde konnten die Halbkugeln nicht voneinander losreißen, so stark drückte die Luft von außen darauf. Die Frage, wieviel „Pferdestärken“ auf die Kugel eingewirkt haben – 8 oder 16 –, ist schon auf Seite 92 gelöst worden.

Guericke hat auch die Größe des Luftdruckes gefunden: Er maß sie als gleich „dem einer neunzehn Magdeburgischen Ellen hohen Wassersäule“ – das sind 10 m. Er wußte nichts davon, daß schon 1643 Torricelli, ein

Schüler Galileis, den gleichen Wert mit der 76 cm langen Quecksilbersäule in der oben geschlossenen Glasröhre gefunden hatte.

Beide hatten erkannt, daß die Luft wie alle Körper von der Erde angezogen wird und mit etwa 1 kp auf 1 cm² drückt. Nach den internationalen Beschlüssen (1954) sind alle Einheiten gesetzlich festgelegt worden. Danach wird die *Einheit des Druckes* aus der Krafteinheit Newton (N), wir kennen sie von der Seite 41 her, und dem Flächeninhalt m² gebildet:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Der zweite Teil der Gleichung ist so entstanden:

$$1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N} = \frac{1 \text{ kg} \cdot 9,80665 \text{ m}}{\text{s}^2}$$

$$1 \text{ N} = \frac{1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m}}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Die Druckeinheit $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ist für praktische Zwecke zu klein; man hat daher

10⁵ N/m² = 1 bar eingeführt (bar vom griechischen barýs = schwer). 1 mbar (1 Millibar) ist der tausendste Teil von 1 bar.

Bisher wurde der Luftdruck in Millimeter Quecksilbersäule (mm Hg) gemessen; Hg ist das chemische Kurzzeichen für Quecksilber = Hydrargyrum. Heute ist statt dessen zu Ehren des italienischen Forschers Evangelista Torricelli (1608 bis 1647) die Bezeichnung Torr eingeführt worden. Der mittlere (normale) Luftdruck beträgt 760 Torr; er wird als physikalische Atmosphäre (atm) bezeichnet, weil der Physiker gern damit arbeitet. 1 Torr ist demnach der 760. Teil der physikalischen Atmosphäre.

Eine (etwas umständliche) Umrechnung ergibt folgende Beziehung zwischen atm und der Krafteinheit kp: 1 atm = 1,0332 kp/cm². Um das Rechnen zu vereinfachen, ist die technische Atmosphäre (at) eingeführt worden: 1 at = 1 kp/cm².

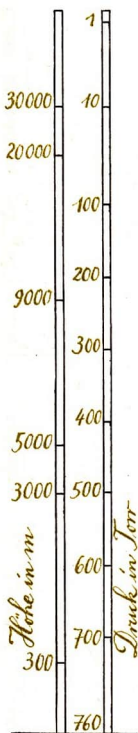
Die Druckeinheiten at, atm und Torr hängen folgendermaßen zusammen:

$$1 \text{ at} = 0,980665 \text{ bar},$$

$$1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar},$$

$$1 \text{ Torr} = \frac{1}{760} \text{ atm} = 133,32 \text{ N/m}^2 = 1,3332 \text{ mbar}.$$

Wir können nun das Gewicht der Luft berechnen, die auf den Magdeburger Halbkugeln lastet: Der Durchmesser der Halbkugeln betrug 37 cm, die Kreisfläche dazu 18,5² · 3,14 cm² = 1060 cm². Wir müssen die Kreisfläche und nicht die Kugelfläche nehmen, weil der Luftdruck nur bei senkrechter Wirkung die angegebene Größe hat. Die Kreisfläche gilt hier als Projektion der Kugelfläche. Über 1 Megapond (1000 kp) lasteten auf jeder Halbkugel!



Der Luftdruck
nimmt mit der
Höhe ab

Perelman hat berechnet, daß (bei völlig luftleerer Kugel) zum Trennen 13 Pferde an jeder Seite nötig gewesen wären.

Kein Wunder, daß die Luft so viel wiegt: Die Luftpille der Erde ist immerhin etwa 400 km dick. Freilich nimmt die Dichte (Masse je cm^3) mit steigender Höhe stark ab; einmal wird die Erdanziehung ja mit steigender Entfernung vom Erdmittelpunkt kleiner, zum anderen, und das ist wichtiger, drücken die oberen Luftschichten die unteren zusammen. Man schließt vom Abnehmen des Luftdruckes sogar auf die Höhe und baut nach diesem Prinzip Höhenmesser.

Die Luftpille wird also von der Erdanziehung festgehalten, sie dreht sich mit der Erde. Warum ist das eine Voraussetzung zum Leben?

Auf den menschlichen Körper wirkt eine riesengroße Drucklast, bei $1,5 \text{ m}^2$ Körperoberfläche 15 Megapond oder 15000 kp. Wir bemerken ihn im allgemeinen nicht, weil im Innern des Körpers (nach außen) genau der gleiche Druck herrscht; die Drücke sind vor allem durch Mund und Nase ausgeglichen. Steigt der Mensch schnell in große Höhe, so herrscht im Körper ein Überdruck; er führt zu Knacken und Sausen im Ohr und eventuell sogar zu Blutungen. Der Fluggast bekommt daher beim Start einen Bonbon; er soll ihn lutschen und dadurch schlucken. Durch das Schlucken wird der Druckunterschied ausgeglichen. Beim Landen geht es umgekehrt; wieder hilft der Bonbon.

Nicht ganz mit Tinte gefüllte Füllhalter laufen beim Befahren eines hohen Berges und beim Aufsteigen des Flugzeuges teilweise aus; die Luft im Halter entspannt sich bei dem geringen Luftdruck und drückt Tinte hinaus. Man muß darauf achten, daß bei nur teilweiser Füllung die Luft an der Feder sitzt und leicht entweichen kann, oder man benutzt einen Füllhalter mit Druckausgleich.

Der Luftdruck wird vielfältig ausgenutzt. Im Haushalt werden beim Einkochen von Lebensmitteln die Gläser mit dem Einkochgut in ein Wasserbad gestellt; sie werden mit Deckel und Gummiring verschlossen. Das Wasserbad (im Einmachkessel) wird zum Sieden gebracht. Dadurch erhitzt sich auch der Inhalt der Gläser, die Luft in ihnen dehnt sich aus und entweicht zwischen Glas und Deckel. Dieser darf also durch die Andruckfeder nicht zu fest gedrückt werden! Nach einer bestimmten Zeit läßt man alles abkühlen. Auch der Inhalt der Gläser kühlt ab und mit ihm die eingeschlossene restliche Luft. Sie zieht sich wieder zusammen, nimmt weniger Platz ein als im heißen Zustand, und es entsteht jetzt ein Unterdruck. Das bedeutet, daß die Luft von außen Überdruck hat und dadurch den Deckel fest auf das Glas preßt. Deckel und Gummiring wirken wie ein Ventil; die heiße Luft wird von innen herausgelassen, die kalte von außen aber abgesperrt.

Physikalisch sehr eindrucksvoll sind die Vakuum-Verpackungen von gemahlenem Kaffee. Er wird in eine luftdichte Hülle aus Plastwerkstoff gefüllt; dann saugt man die Luft aus der Hülle und verschließt diese. Der äußere Luftdruck preßt Hülle und Kaffee zu einem festen Stück zusammen. Sobald die Hülle irgendwo geöffnet wird, dringt die Luft ein, und der Inhalt fällt auseinander. Auf diese Weise lassen sich viele Lebensmittel

lange Zeit hindurch frischhalten. Bei Verpackung in Blechbüchsen muß man überlegen, ob die geraden Flächen von Boden und Deckel den Druck aushalten; meist erzeugt man hier nur ein Teilvakuum.

Das wichtigste Anwendungsgebiet des Luftdruckes sind die Pumpen aller Art. Wenn wir Saft mit einem Röhrchen aus dem Glas saugen, benutzen wir das Prinzip der Saugpumpe: Wir erzeugen durch Saugen einen Unterdruck, und der äußere Luftdruck, der auf die ganze Oberfläche des Saftes im Glase wirkt, drückt den Saft in das Röhrchen hinein. Erst wenn wir ein senkrechtes Rohr von mehr als 10 m Länge nehmen und oben (nun besser mit Maschinenkraft) saugen, dann bleibt das Wasser, 10 m lang, darin „hängen“ – diese Wassersäule ist ebenso schwer wie die Luft, und es herrscht Gleichgewicht. Dadurch kann eine Saugpumpe kein Wasser höher als 10 m heben.



Wir messen den Luftdruck

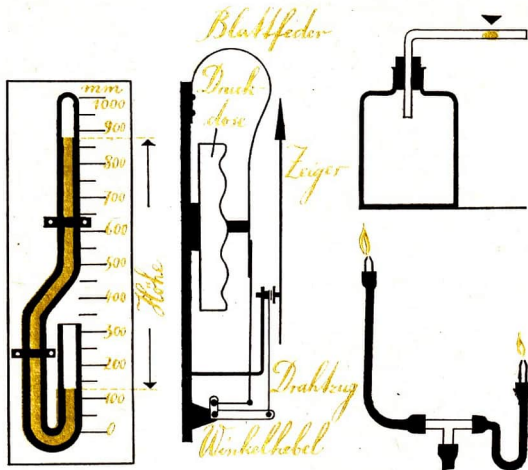
Gemessen wird der Luftdruck in wissenschaftlichen Instituten noch vielfach mit dem sehr genauen Quecksilber-Barometer (Schweremesser). Die umstehende Abbildung zeigt das Prinzip. Im obersten Teil der Röhre ist ein Vakuum, eine Luftleere. Im täglichen Leben wird das flüssigkeitsfreie Barometer benutzt, auch Dosenbarometer oder Aneroidbarometer genannt; das Wort kommt vom griechischen a-nerós = nichtfeucht und éidos = Gestalt. Eine fast luftleer gepumpte Dose hat einen Deckel aus elastischem Metallblech. Je nach der Größe des Luftdruckes wird dieser Deckel mehr oder weniger in die Dose gedrückt, und die jeweilige Stellung wird auf einen Zeiger übertragen, der vor einer Skale spielt, auf der wir dann den Barometerstand ablesen können.

Wir ändern den Luftdruck

Das läßt sich leider nur in kleinstem Rahmen machen – sonst könnten wir das Wetter beeinflussen! Wir stecken ein Dosenbarometer in eine durchsichtige Plastiktüte, verschließen diese bis auf eine kleine Öffnung und blasen hinein. Sofort zeigt das Barometer einen höheren Wert an – der Kraft unserer Lunge entsprechend.

Wir wandern mit dem Barometer

Wir steigen mit einem gewöhnlichen Aneroidbarometer vom Keller eines hohen Hauses bis auf den Boden oder gar auf einen Kirchturm und vergleichen den Barometerstand zu Beginn und am Ende unserer Ersteigung. Der Zeiger ist zurückgegangen.



So wird der Luftdruck angezeigt und gemessen

Der wandernde Tropfen

Wer kein Barometer besitzt, kann ein Gerät bauen, das schon geringe Druckunterschiede der Luft anzeigt. Eine große Flasche wird fest mit einem durchlochten Gummistopfen verschlossen. In den Stopfen stecken wir ein rechtwinklig gebogenes Glasrohr von etwa 1 mm lichter Weite; in die Mitte des waagerechten Rohrteils bringen wir einen Tropfen gefärbten Wassers. Die Flasche wird in einen Karton mit Watte oder einem anderen wärmedämmenden Stoff gesteckt, damit sich die Luft darin nicht durch Wärmeeinflüsse von außen ausdehnt oder zusammenzieht (das ist ein anderer Versuch!).

Dieses kleine Gerät ist so empfindlich, daß der Tropfen schon den Luftdruck-Unterschied unten und oben im Zimmer anzeigt; wir wandern mit dem Gerät auch ein Stockwerk tiefer und höher. Je tiefer wir steigen, um so mehr drückt die Luft auf die Flasche und damit den Tropfen zur Flasche hin.

Ein anderes Gerät ist auch leicht zu bauen: Eine Flasche mit breiter Öffnung wird mit einer dünnen, dicht schließenden Gummimembran (etwa von einem Kinderluftballon) verschlossen. Die Membran bewegt sich mit

dem wechselnden Luftdruck; man kann diese Bewegung leicht auf einen Zeiger übertragen, ausgehend von einer dünnen Korkscheibe, die man in der Mitte der Membran aufklebt.

Flammen zeigen den Luftdruck an

Zwei Glasspitzen werden mit Schläuchen an ein T-Stück angeschlossen, das mit der Gasleitung verbunden ist. Man regelt mit einem Gashahn den Gasdruck so ein, daß die an den beiden gleichhoch stehenden Glasspitzen brennenden Flämmchen etwa 1 cm lang sind; sie sollen noch eine gut erkennbare leuchtende Kappe haben.

Senken wir die eine der beiden Flammen um einige Zentimeter, so wird sie kleiner, denn sie steht unter einem größeren Luftdruck. Der Druckunterschied ist sehr klein, und doch macht er sich bei der Flamme bemerkbar. Da der (übrigens geringe) Gasdruck gleichbleibt, bekommt die höher stehende Flamme nun mehr Gas und wird größer, leuchtender.

Der Einmach-Grundversuch

Wir werfen ein brennendes Stück Papier in ein Einmachglas und lassen die Luft im Glas recht heiß werden; das Glas springt dabei hoffentlich nicht. Ist die Luft heiß, legen wir Gummiring und Deckel fest auf und lassen die Luft abkühlen. Dabei verringert sie ihr Volumen, und es entsteht im Glas ein Unterdruck; der äußere Luftdruck drückt den Deckel fest auf das Glas.

Diesen Versuch kann man auch mit einem Trinkglas machen; an Stelle des Glasdeckels spannt man eine dünne Gummihaut (etwa ein Stück eines Kinderluftballons) dicht und fest über die Glasöffnung. Die Gummihaut wird durch den äußeren Luftdruck tief in das Glas hineingedrückt. Verletzt man die Haut mit einer Messer- oder Nadelspitze, so dringt die Luft mit einem Knall in den luftverdünnten Raum ein.

Mit zwei Wassergläsern mit gleichen Randdurchmessern und einem dazu passenden Gummiring kann man diesen Versuch so ändern, daß er an die Magdeburger Halbkugeln erinnert: Die Luft in beiden Gläsern wird wieder erhitzt und verdünnt (hier genügt auch je ein brennender Kerzenrest); dann werden die Gläser mit dem Gummiring als Dichtung aneinandergedrückt. Sie halten nach dem Abkühlen fest zusammen.

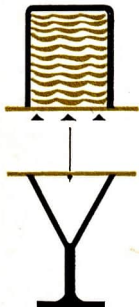
Der zerschmetterte Kanister

Wir füllen in einen leeren Öl-Blechanister mit rechteckigem Boden und dicht schließendem Verschuß (möglichst Schraubverschluß) einige Zentimeter hoch Wasser und bringen dieses über einer Gasflamme zum Sieden. Nach einigen Minuten hat der entstehende Wasserdampf die Luft weitgehend verdrängt.



Jetzt nehmen wir den Kanister von der Flamme und verschließen ihn gleichzeitig ganz dicht. Er kühlt ab, der Dampf kondensiert, und ein ziemlich großer Unterdruck entsteht. Im Gegensatz zu einer gewölbten Fläche halten die geraden Flächen des Behälters den äußeren Luft-Überdruck nicht aus; sie brechen nach innen zusammen – der Kanister „implodiert“. Am eindrucksvollsten geschieht das, wenn wir den verschlossenen Kanister gleich mit kaltem Wasser übergießen.

Dieser Versuch läßt sich im kleinen mit einer leeren Metalltube (von Zahnpasta oder anderem) durchführen. Die Tube, leergequetscht, aber ohne Biegestellen, wird verschlossen und vorsichtig erwärmt, bis die verdampfenden Reste des einstigen Inhaltes die Tube wieder ausgedehnt haben. Als „Sicherheitsventil“ kann man dabei an Stelle der Verschlußschraube einen Pfropfen aus Kitt verwenden oder eine etwas zu große Verschlußmutter nehmen. Hat die Tube ihre alte Form wieder, so füllen wir etwa 5 ml Wasser hinein und bringen es vorsichtig zum Sieden. Während der Wasserdampf entweicht, nehmen wir die Tube von der Flamme und verschließen gleichzeitig die Öffnung fest. (Vorsichtig seitlich mit den Fingern herankommen, damit sie nicht verbrüht werden!) Wir übergießen die Tube mit kaltem Wasser – und sie wird durch den Luftdruck zusammengepreßt.



Das schwebende Wasser

Wir füllen ein Glas bis zum Rande mit Wasser, bedecken es mit einem Blatt starken, vorher angefeuchteten Papiers und drehen es um; dabei drücken wir das Papier an. Jetzt können wir das Papier loslassen – das Wasser fließt nicht aus! Der Luftdruck wirkt einseitig von unten und preßt das Papier an das Glas. Der Druck des Wassers von oben ist im Vergleich dagegen winzig; 10 m hoch müßte die Wassersäule sein, wie schon Torricelli gefunden hat.

Der Luftdruck trägt ein Glas

Diesmal nehmen wir ein möglichst leichtes Glas, um das Schicksal nicht herauszufordern. Wir fetten den Rand etwas ein und füllen das Glas bis zum Rande mit Wasser. In der Mitte einer kreisrunden Scheibe aus Karton, etwas größer als die Glasöffnung, befestigen wir einen Bindfaden; entweder kleben wir das Ende auf den Karton fest, oder wir führen ihn durch ein kleines Loch im Karton hindurch. Im letzten Fall muß das Loch hinterher sorgfältig mit Paraffin oder Plastklebstoff gedichtet werden. Die Kartonscheibe wird auf den Glasrand gepreßt; jetzt läßt sich das Glas am Faden hochheben und sogar pendeln. Der Grund ist der gleiche wie bei dem vorhergehenden Versuch.

*Versuche zur
Luftdruckwirkung*

Weiteres vom Unterdruck

Es gibt noch viele, sehr viele Versuche dieser Art: eine Flasche voll Wasserdampf an einem Teller haften lassen; den Handteller mit herabhängen-

den Fingern in ein Glas drücken und die Finger dann ausstrecken – das Glas haftet an der Hand; einen der Gummi-Sauger benutzen, mit denen Haken an glatten Flächen haftenbleiben, und anderes mehr. Wenn wir noch ein hartgekochtes Ei zur Verfügung haben, können wir es folgendermaßen zu einem Versuch mißbrauchen: Wir verdünnen auf die bekannte Weise – Abbrennen von Papier – die Luft in einer Wasserkaraffe. Als Stöpsel setzen wir das hartgekochte und geschälte Ei auf den Flaschenhals. Das Ergebnis ist sehenswert: Das Ei wird immer länger und schmaler, gleitet durch den Flaschenhals und fällt plötzlich mit lautem Knall in die Flasche. Wie das Ei freilich wieder aus der Karaffe herauskommt, das ist eine andere Frage.

Harmloser ist der Versuch mit dem aufsteigenden Reagenzglas. Wir brauchen zwei solche Gläser, ein größeres sowie ein kleineres, das leicht in das größere hineingeht; etwa 17 mm lichte Weite beim großen, 15,5 mm Außendurchmesser beim kleinen Reagenzglas. Wir füllen das große Glas halb mit Wasser und stecken das leere kleine Glas hinein; das Wasser füllt den Zwischenraum zwischen beiden Gläsern aus. Wir legen ein Tuch in das Becken oder die Schüssel, über der wir den Versuch machen, damit das Glas beim Mißlingen des ersten Versuches nicht zerbricht. Wir drehen beide Gläser sehr schnell um 180°; das kleine hängt in dem großen. Während Wasser aus dem Zwischenraum ausläuft, steigt das kleine – notfalls nach einem kleinen Anstoß – mit wachsender Geschwindigkeit in das große Reagenzglas hinein. Diese verblüffende Erscheinung hat mehrere Gründe; der Luft-Unterdruck, der oben im großen Glas durch das Herausfließen des Wassers entsteht, ist daran wesentlich beteiligt.

Daß mehrere Naturgesetze zur Erklärung eines Versuches nötig sind, kommt nicht selten vor. Erinnern wir uns der Schlag- und Reißversuche mit der Zeitung auf den Seiten 49 und 50. Damals hatten wir zwar das Gewicht der Luft schon als einen Grund für das Gelingen genannt, die ganze Sache aber hauptsächlich mit dem Trägheitswiderstand der Luft begründet. Jetzt wissen wir, wieso auch der Luftdruck eine Rolle bei den genannten Versuchen spielte: Weil seitlich unter die eng anliegende Zeitung nicht schnell genug Luft einströmen konnte, hätte sich dort ein luftverdünnter Raum bilden müssen; das ließ der Luftdruck nicht zu. Er war stärker als das Holz und als das Zugseil.

Der Springbrunnen

Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten. Das eine Verfahren, Wasser aus größerer Höhe herab in die Springbrunnenspitze laufen zu lassen (Naturgesetz der kommunizierenden Röhren, miteinander verbundene Flüssigkeiten stellen sich gleichhoch ein), dieses Verfahren wollen wir nicht anwenden. Wir sind mit dem Luftdruck beschäftigt und lassen diesen für uns arbeiten. Also lassen wir den Luftdruck Wasser in ein luftverdünntes Gefäß drücken! Wir lassen in einem Rundkolben (keinen Kochkolben mit flachem Boden verwenden! Warum?) vorsichtig etwas Wasser siedend. Die Rundkolben sind ziemlich dickwandig und springen leicht bei zu schnellem Er-



Teils „spritzi-“
Luftdruckversuche



hitzen! Die dicken, gewölbten Wände halten aber dem äußeren Luftdruck am besten stand. Ist der Kolben voll Wasserdampf und die Luft hinausgedrückt, dann nehmen wir den Kolben von der Flamme fort und verschließen ihn ganz dicht mit einem Stopfen, in dem ein Glasrohr steckt. Ein Ende des Rohrs läuft in eine Spitze mit enger Öffnung aus; diese Spitze ragt in den Kolben. Das andere Ende des Rohrs haben wir vorher in Wasser gesteckt. Der Rest des Wassers im erhitzten Kolben muß unterhalb der Spitze bleiben. Da der äußere Luftdruck unseren Kolben eventuell zerdrücken kann, umwickeln wir ihn nahezu vollständig mit einem Handtuch. Es wird auch gut sein, bei diesem Versuch eine Schutzbrille zu tragen. Sobald der Kolben sich abkühlt, kondensiert der Wasserdampf darin; ein luftverdünnter Raum entsteht, und der Springbrunnen ist da. Es wird so viel Wasser hineingedrückt, wie wir vorher Luft entfernt haben. Noch schneller erhalten wir einen Springbrunnen nach der umstehenden Abbildung. In der Flasche muß noch genügend Luft sein; diese verdichten wir durch kräftiges Blasen in die Röhre. Diese Anordnung nennt man „Heronball“.

Am schnellsten haben wir unseren Springbrunnen, wenn wir einen Trichter sehr schnell in Wasser drücken, mit dem Ausflußrohr nach oben. Er bringt freilich nur einen kurzen, stoßartigen Strahl zustande; aber der springt ziemlich hoch. Es erhebt sich leider gleichzeitig die bange Frage: Gehört dieser Springbrunnen überhaupt hierher?

Wir wägen die Luft

Die Luft läßt sich tatsächlich fast so leicht wie irgendein Gegenstand wägen: Wir brauchen dazu eine möglichst empfindliche Waage, einen Rundkolben und einen dazu passenden Gummistopfen mit einer Bohrung, ein Glasrohr mit Hahn für den Stopfen und schließlich unsere Wasserstrahl-Luftpumpe. Der Rundkolben mit fest eingesetztem Stopfen und offenem Hahn wird genau gewogen. Wir verdünnen danach die Luft im Kolben soweit wie möglich und wägen wieder. Die Differenz ist das Gewicht – bei Messung mit der Balkenwaage die Masse – der herausgepumpten Luft. Jetzt stecken wir das aus dem Stopfen ragende Glasrohr in das Wasser und öffnen den Hahn (vorher Schutzbrille aufsetzen!). Durch den äußeren Luftüberdruck werden ebenso viele ml Wasser in den Kolben gedrückt, wie wir vorher Wasser herausgepumpt haben. Ist der Druck ausgeglichen, so messen wir in einem Meßglas die Menge (das Volumen) des eingedrungenen Wassers und kennen damit zugleich die Menge der herausgepumpten Luft. Deren Gewicht oder Masse war uns durch die Wägung bekannt; nun können wir auch die Wichte (Gewicht/Volumen) und die Dichte (Masse/Volumen) der Luft berechnen. Ein Liter Luft wiegt bei Normaldruck unter 45° Breite 1,293 p.



Eine Münze ins Trockene bringen

Auf einem flachen großen Teller liegt an einer Seite eine Geldmünze in so viel Wasser, daß sie eben damit bedeckt ist. Diese Münze darf derjenige

behalten, der sie mit den Fingern herausholt, ohne daß diese dabei naß werden und ohne daß das Wasser ausgekippt wird.

Kluge Menschen legen an einer anderen Stelle des Tellers Münzen etwa 1 cm hoch übereinander ins Wasser und stellen darauf einen Kerzenstumpf. Sie zünden die Kerze an und stülpen ein Wasserglas darüber. (Das zu erobernde Geldstück liegt außerhalb des Glases.) Das Wasser steigt im Glas empor, und die Münze liegt bald greifbar auf dem Trockenen! Warum?

Ist die Kaffeekanne hinterhältig?

Nein, natürlich nicht; der Benutzer hat nur nicht physikalisch nachgedacht. Die Kanne war voll guten Kaffees, der Deckel, an der Unterseite naß geworden, saß luftdicht auf der Kanne. Der Gastgeber hielt die Kanne schräg, um einzuschenken – kein Kaffee kam. Er hielt sie noch schräger – plötzlich sprang ein starker Kaffeestrahle heraus, natürlich über die Tasse hinweg auf das (in solchen Fällen immer frische) Tischtuch.

Die Erklärung liegt auf der Hand. Durch den luftdicht schließenden Deckel kann keine Luft nachströmen. Der Kaffee fließt erst, wenn die Luft durch den Ausguß Eingang findet oder der Deckel plötzlich Luft durchläßt. Abhilfe gibt ein kleines Luftloch im Deckel; sonst muß man vor dem Einschenken stets den Deckel anheben. Nebenbei bemerkt: Teekannen benehmen sich genauso.

Einiges von der Strömung

Wir wollen uns einiger Beobachtungen erinnern, die wir früher gemacht haben, ohne darüber nachgedacht zu haben: Wird der Wasserhahn wenig aufgedreht, dann fließt der Strahl gleichmäßig, ruhig; dreht man weiter auf, so wird er wild, unruhig. Der Rauch aus dem Schornstein steigt bei Windstille kerzengerade hoch und bildet dann merkwürdige Figuren, richtige Wirbel. Fragen tauchen auf: Wie wirkt eigentlich unsere Wasserstrahlpumpe? Warum kann man im fahrenden Wagen das Fenster ein wenig öffnen, ohne daß der ruhige Luftzug stört – während bei offenem Fenster die Luft unangenehm wirbelt? Wieso zieht das hintere kleine Fenster die verbrauchte Luft aus dem Wagen? Und wie ist die Sache mit den Zerstäubern, ganz gleich, ob es um guten Duft oder gegen die Fliegen geht?

Wieso bilden sich bei Wind auf dem Wasser Wellen? Etwa aus dem gleichen Grund wie die „Sandwellen“ in den Dünen und in der Wüste? Und warum kann ein Sturm Dächer abdecken und Fensterscheiben nach außen drücken, wenn er gar nicht unter das Dach und hinter die Scheibe kommen konnte? Warum flattert eine Fahne im Wind, nicht einmal die Windfahne steht still?



Schichten und Wirbel

Fragen über Fragen, und doch sind alle mit Hilfe weniger Naturgesetze zu beantworten. In Wasser und in Luft – beide Medien verhalten sich in dieser Hinsicht weitgehend gleich – haben wir zwei Arten von Strömungen: die gleichmäßige und die wirbelnde; der aufsteigende Rauch zeigt beide. Der Physiker nennt die gleichmäßige *laminar* (vom lateinischen *lámina* = Blatt, Schicht). Man stellt sich die strömende Flüssigkeit oder das strömende Gas in einzelnen Schichten, Streifen oder Linien vor; jedes Teilchen bleibt stets in einer bestimmten Fläche und bewegt sich in Richtung des Stromes. Wirbel entstehen nicht, denn die setzen voraus, daß Teilchen ihre Richtung ändern.



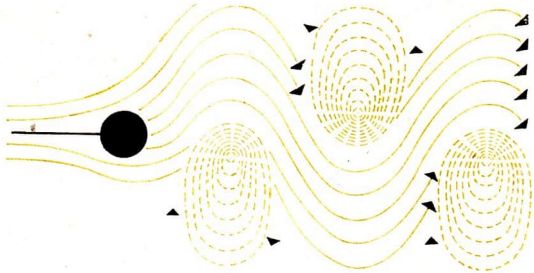
Die laminare Strömung wird turbulent

Da gibt es wieder eine Grenzfläche, die (beispielsweise bei Wasser im Rohr) die Rohrwandung benetzt und ruhig sitzenbleibt. Dort entstehen leicht Reibungen. Wird die sogenannte *kritische Geschwindigkeit* überschritten, so bilden sich in der Grenzschicht und durch die innere Reibung auch innerhalb des Stromes Wirbel; viele Teilchen sind aus ihrer Strömungsrichtung abgelenkt worden. Die wirbelnde oder – wie der Physiker sagt – die *turbulente Strömung* entsteht. (vom lateinischen *turbulentus* = unruhig, stürmisch, voller Wirbel). Sie ist weitaus häufiger als die laminare und bringt viele merkwürdige und häufig höchst unerfreuliche Wirkungen hervor.

Wir sehen bei stärkerem Wind gelegentlich, wie der Staub in den Straßen hochwirbelt. So wirbelt die Luft um den ganzen Erdball, hier drückend (verstärkter Luftdruck), dort saugend (verminderter Luftdruck), und auf diese Weise entstehen die Wellen im Wasser und im Sand, werden Dächer hochgehoben und Fenster nach außen gedrückt (der Luftdruck innen, unter dem Dach und hinter dem Fenster, wird plötzlich größer als außen). Hinter einem Fahnenmast bildet der Wind eine Wirbelstraße; daher flattert die Fahne.

Wirbel sind unberechenbar, wenn sie als Naturereignis auftreten; hier können sie nur Schaden anrichten. In berechenbaren Ausmaßen dagegen benutzt sie der Mensch vielfach für seine technischen Zwecke; er hat gelernt, sie je nach den Gegebenheiten zu erzeugen oder auch zu vermeiden.

Große Bedeutung hat der *Strömungswiderstand*, das ist der Widerstand, den die Luft dem bewegten Körper entgegensetzt. Es ist dabei gleich, ob



Strömungsverlauf in Wirbeln

sich die Luft bewegt und der Körper ruhig verhält oder umgekehrt; wichtig ist die relative Geschwindigkeit des einen Teiles gegenüber dem anderen. Die Größe des Strömungswiderstandes ist von der Größe, der Form und der Oberflächenbeschaffenheit des „angeströmten Körpers“ und von der Dichte des strömenden Mediums (etwa der Luft oder des Wassers) abhängig. Die Abbildung auf Seite 127 zeigt, wie sich die Form des Körpers auswirkt. Je mehr Wirbel sich an einem fliegenden oder fahrenden Körper ausbilden, um so größer ist der Strömungswiderstand; die Wirbel saugen den Körper zurück. Man muß also Fahrzeugen möglichst solche Form geben, die die Wirbelbildung vermeidet. Das ist ein Musterbeispiel dafür, wie die Naturgesetze die Technik beeinflussen. Je einfacher und unmittelbarer die Maschine den Forderungen der Naturgesetze entspricht, um so wirtschaftlicher arbeitet sie, um so weniger Energie geht dabei in unerwünschte Formen über, die nicht nützen, sondern nur schaden können.

Die Wirbel hinter dem Brett

Wir füllen eine Wanne mit Wasser und streuen Korkmehl, Bärlappsamen oder einen anderen leichten, fettfreien Schwimmkörper in fein verteilter Form darauf. Dann fahren wir mit einem senkrecht gehaltenen Brettchen im Wasser von einer Seite zur anderen. Ergebnis: Hinter dem Brettchen bilden sich kräftige Wirbel.

Dinge im Bereich dieser Wirbel werden sogar mitgezogen; das wird der nächste Versuch zeigen. Wir werden hier an den Schrittmacher und den Steher im Rennsport erinnert: Auch im Rücken des Schrittmachers entstehen Wirbel, und diese ziehen „im Sog“ den Steher bis zu einem gewissen Grade mit.

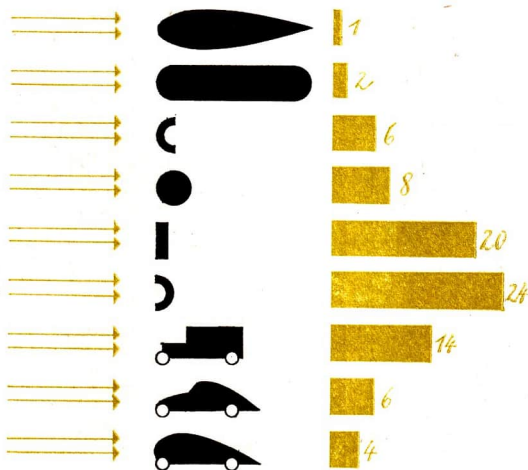
Die künstlichen Rauchringe

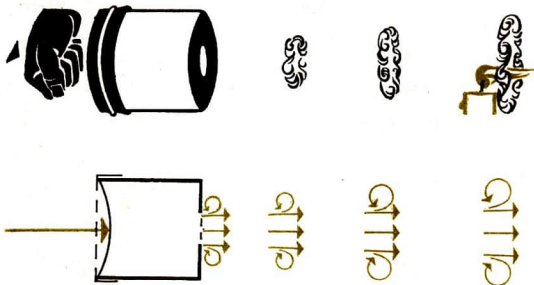
Nicht jeder Raucher kann formvollendete Ringe blasen – und dem Nichtraucher darf man das sowieso nicht zumuten. Also stellen wir sie künstlich her, denn sie sind, physikalisch gesehen, geschlossene Wirbel und recht reizvoll.

In den Boden einer großen Konservendose oder Pappbüchse schneiden wir ein rundes Loch von 1 bis 2 cm Durchmesser (gegebenenfalls auch bis 4 cm; das muß man prüfen). An Stelle des Deckels wird eine Gummi- oder Zellophanhaut luftdicht über die Öffnung gespannt; auch ein Deckel aus Plastikwerkstoff von einer runden Bonbondose ist oft gut geeignet. In etwa 50 cm Entfernung von der Dose stellen wir eine brennende Kerze auf; die Flamme muß so hoch stehen wie das Loch in der Dose.

Nun füllen wir die Dose mit Tabakrauch; im Notfall hilft auch ein Räucherkerzen oder ein glimmender Schnürsenkel. Ist die Dose mit Rauch gefüllt, dann klopfen wir gegen die elastische Bespannung. An der Dosenöffnung erscheint ein ringförmig geschlossener Rauchwirbel; er löst sich ab und fliegt schnell senkrecht zu seiner Ebene fort. Hat er die Flamme er-

Verhältnis der Luftwiderstände verschiedener Körper

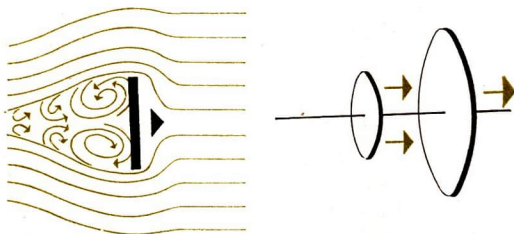




reicht, zeigt sich etwas höchst Merkwürdiges: Der Wirbelring benimmt sich wie ein fester Körper und löscht die Flamme aus. So stark ist die Luftbewegung im Wirbel.

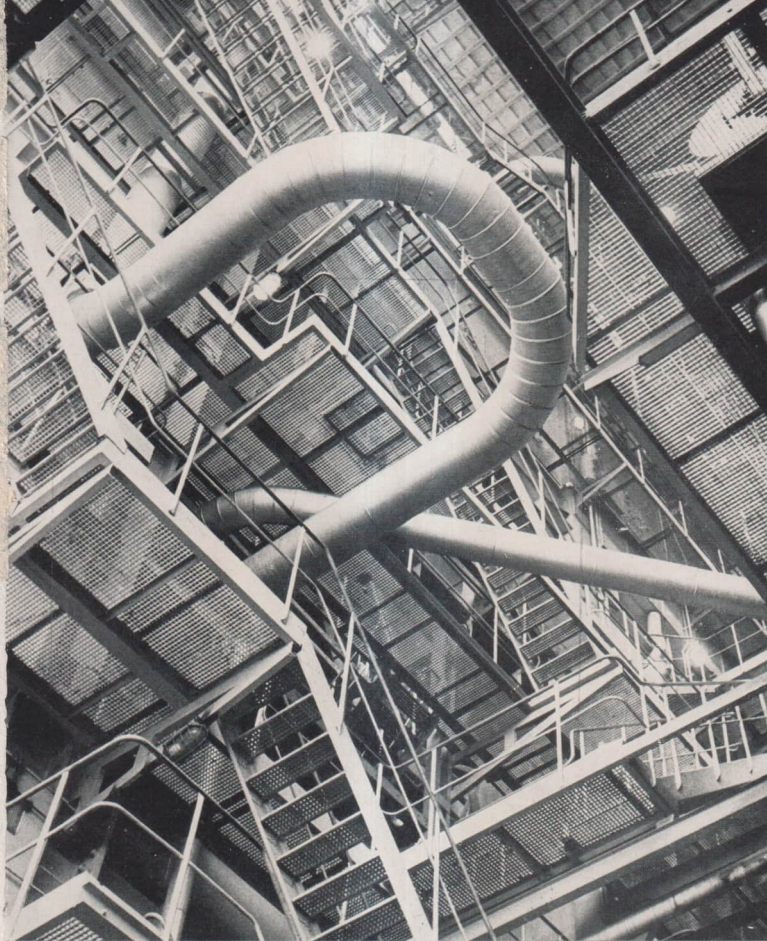
Die anhängliche Pappscheibe

Nach der untenstehenden Abbildung werden auf einem straff gespannten Draht zwei leicht bewegliche Pappscheiben, eine große und eine kleine, befestigt. Bewegt man die große schnell, so wird die kleine an die große herangezogen.

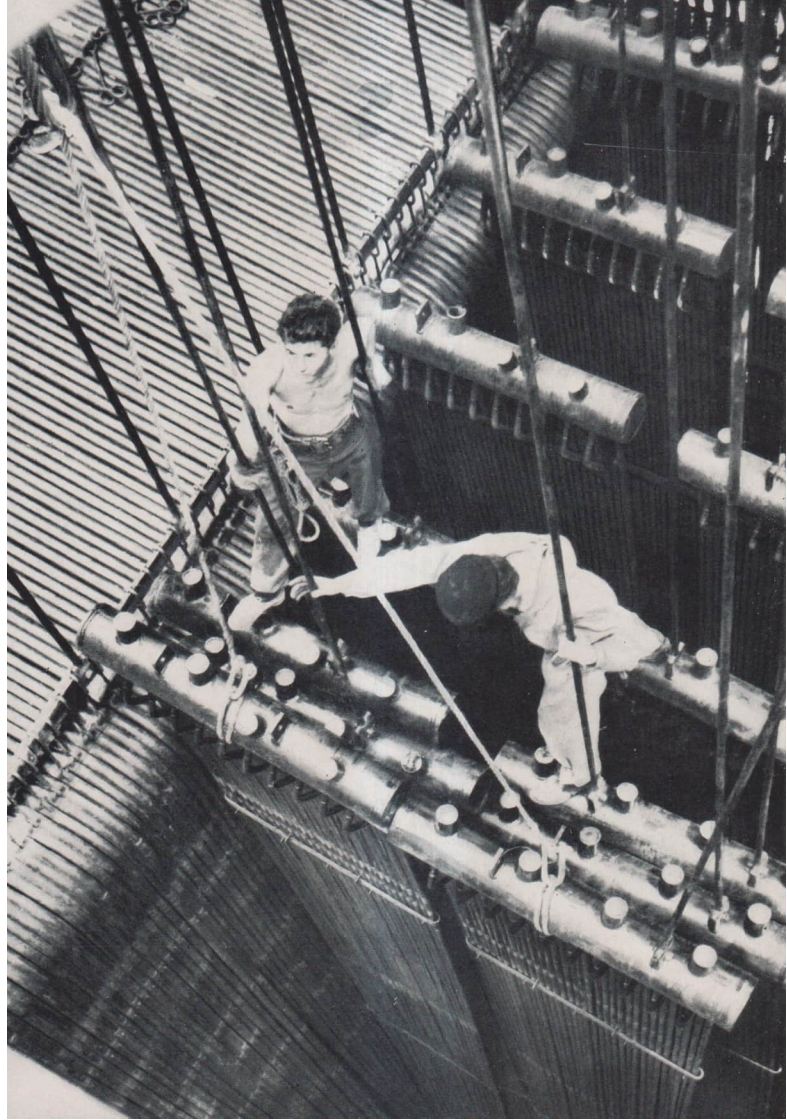


Geschwindigkeit und Druck

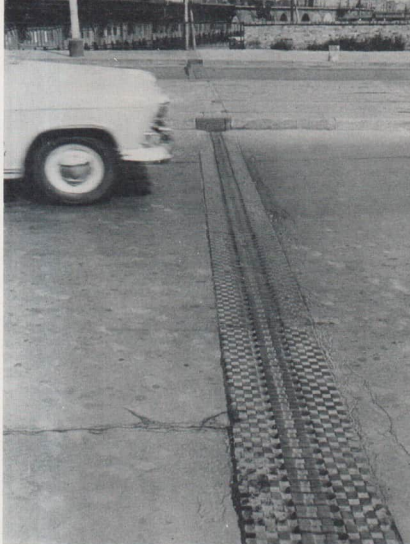
Dieses Experiment zeigt uns, daß der statische Druck der strömenden Teilchen von ihrer Geschwindigkeit abhängt. Hinter der großen Pappscheibe entsteht bei genügender Geschwindigkeit ein Wirbelgebiet. Hier



Rohrbogen nehmen die Wärmeausdehnung in Leitungen auf und wirken ausgleichend.

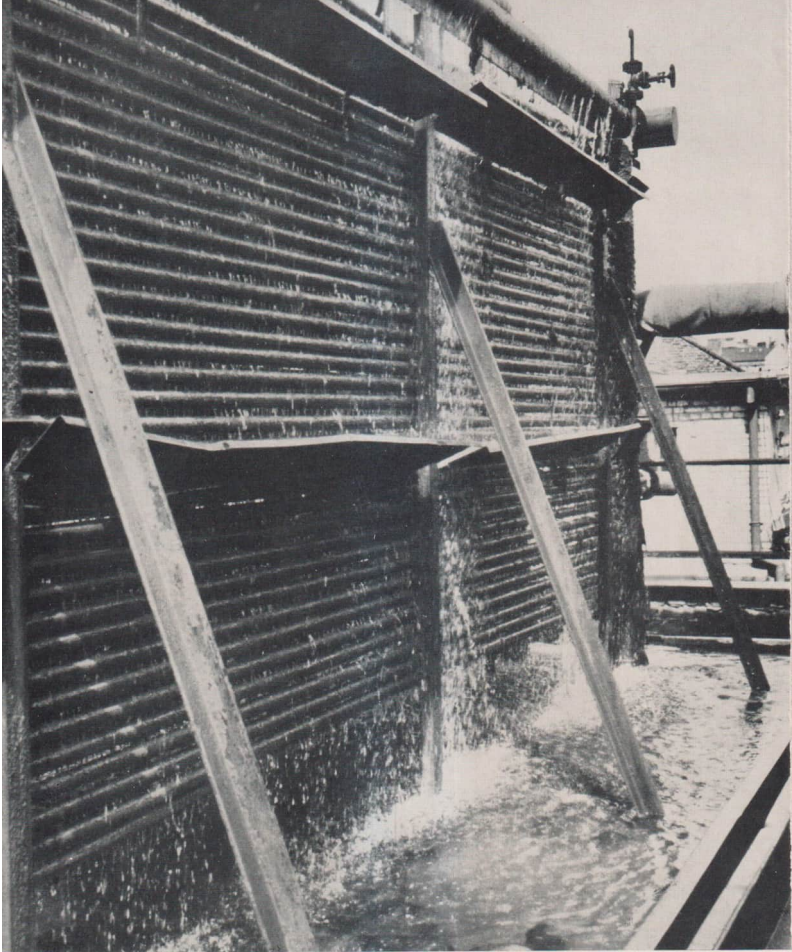


- ◀ Wärmeübertragungsprozesse sind die wichtigste Grundlage unserer Energieerzeugung. Hier werden die Rohre eines Hochdruckkessels in einem modernen Wärmekraftwerk montiert. Derartige Rohrbündel wirken wegen ihrer großen Oberfläche bei der Wärmeübertragung günstig.



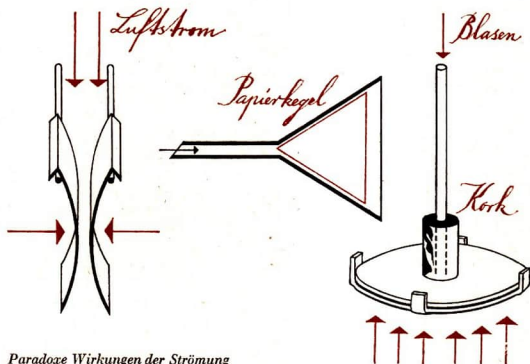
Stahlbrücken müssen beweglich gelagert werden, um die Wärmeausdehnung zu ermöglichen. Auch im Brückenbelag wird meist auf einer Seite eine Dehnfuge eingebaut.





Kühlanlagen haben umfangreiche Rückkühler, in denen das Kältemittel die aus den Kühlräumen abgeführte Wärme an vorbeiströmendes Wasser abgibt.

haben die Teilchen eine größere Geschwindigkeit, und dadurch wird der statische Druck geringer als in der Umgebung. Wir stellen fest: *Je geringer die Geschwindigkeit der strömenden Teilchen ist, um so größer ist der statische Druck, den sie (etwa auf die Rohrwandung) ausüben – und umgekehrt.* Auf diese Weise verändert sich beim Orkan mit seiner großen, oft wechselnden Luftgeschwindigkeit der Luftdruck in unregelmäßigen Stößen, und die Dächer werden durch den dabei zeitweilig auftretenden Überdruck von innen hochgehoben. Dazu wollen wir noch einige Versuche anstellen.



Paradoxe Wirkungen der Strömung

Die hängenden Postkarten

Wir hängen zwei gewölbte Postkarten mit kleinem Abstand nebeneinander auf und blasen von oben in den Zwischenraum. Das Ergebnis verblüfft so sehr, daß man die Erscheinung ein *Paradoxon* nennt, ein scheinbar Widersinniges: Die Karten gehen nicht etwa auseinander, sondern zusammen. Wir wissen, warum: Infolge der schnellen Luftströmung entsteht ein Unterdruck zwischen den Karten; die Außenluft mit ihrem unveränderten Druck drückt sie zusammen.

Aerodynamische Experimente mit einem Trichter

Wir versehen einen Trichter, etwa 10 cm Durchmesser, mit einem Gummischlauch, den wir (nach Säuberung) in den Mund stecken können. Wir blasen stark durch den Trichter und nähern seinen unteren Rand einem Wattelöckchen. Es wird in den Trichter gesaugt und zeigt deutlich die Luftwirbel an.

Wir halten die Mitte der Trichteröffnung vor eine Kerzenflamme und blasen: Die Flamme wird angesaugt.

Wir legen einen passend geschnittenen Papierkegel, etwa aus Filterpapier oder Durchschlagpapier, in den Trichter und blasen: Der Kegel wird in den Trichter hineingezogen.

Die paradoxen Pappscheiben

Wir schneiden aus dünner Pappe zwei Kreisscheiben von etwa 8 cm Durchmesser; eine von ihnen erhält als Führung vier kleine nach oben gebogene Zungen. Die obere Scheibe bekommt in der Mitte ein Loch. Darüber kleben wir luftdicht einen durchbohrten Kork mit Glasröhrchen. Saugen wir an der Röhre, so bleibt die untere Scheibe an der oberen haften – wir haben ja die Luft innen verdünnt, und die Außenluft drückt nun. Aber die untere Scheibe wird auch angezogen, wenn wir blasen!

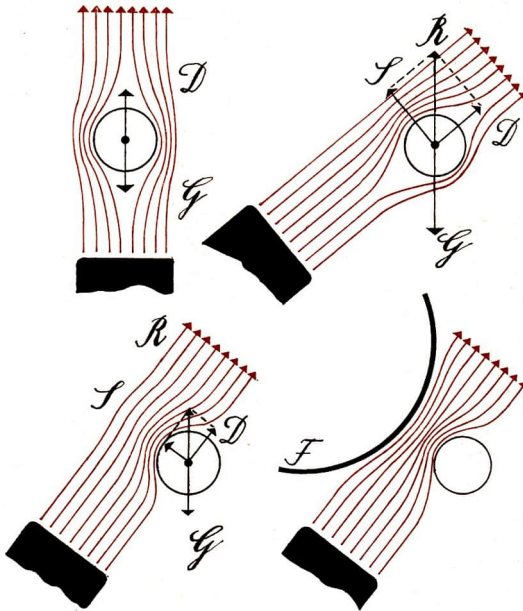
In bewegter Luft ist der statische (ruhende) Druck nach den Seiten verringert. In unserem Gerät strömt die Luft zwischen den Scheiben nach außen; also ist hier der Druck geringer als auf der Unterseite der unteren Scheibe (mit Ausnahme der Mitte, in der unser Blasstrom auftritt). Die untere Scheibe wird also zunächst angesaugt. Dadurch wird der Blasstrom gedrosselt; die Scheibe steigt wieder. Ein *dynamisches Gleichgewicht* zwischen Sog und Schwerkraft entsteht, und in diesem hält sich, leicht zitternd, die untere Scheibe.

Experimente mit dem Haartrockner

Wir befestigen einen Haartrockner so, daß sein Luftstrom senkrecht nach oben gerichtet ist. Wir schalten ein und bringen einen Tischtennisball in den Luftstrom; der Ball schwebt in einigen Zentimetern Entfernung. Sein Gewicht G wird durch die dynamische Druckkraft D des Luftstromes aufgehoben; es herrscht Gleichgewicht. Stellen wir den Luftstrom schräg ein, so bleibt der Ball noch im Strom.

Mit einiger Geschicklichkeit kann man den Ball auch unten an den 45° schrägen Luftstrom hängen. Er taucht so weit in die Strömung ein, daß die Stromlinien genügend verdichtet werden und dadurch ein Sog entsteht. Das Kräfteparallelogramm macht das klar: S ist der Auftrieb (Sog), G das Gewicht des Balls, D die dynamische Druckkraft, R die aus S und D resultierende Luftkraft, die dem Gewicht G das Gleichgewicht hält.

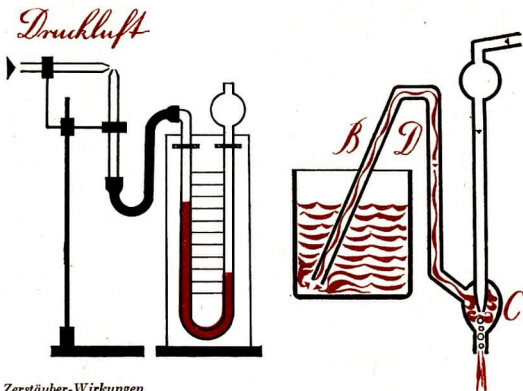
Nähern wir diesem „hängenden“ Ball von oben her eine gewölbte Fläche (Blech, Flasche von etwa 10 cm Durchmesser oder etwas Ähnliches), so werden die Stromlinien stärker verdichtet. Dadurch wird der statische Druck des Luftstromes nach den Seiten weiter verringert, der Sog größer, und der Ball wird angehoben und berührt die Fläche. Dadurch wird der Luftstrom aber unterbrochen, der Ball fällt in die vorherige Lage zurück – und das Spiel beginnt von neuem.



Der Unterdruck im Zerstäuber

Ein U-förmig gebogenes Glasrohr, an einem senkrechten Brettchen befestigt und halb mit gefärbtem Wasser (etwas Tinte nehmen) gefüllt, ist ein trefflicher Druckanzeiger (Manometer) für unser Labor; es zeigt Überdruck und Unterdruck an. Eine Skale unter dem Rohr erlaubt auch Messungen.

Ein Zerstäuber besteht immer aus einem Druckrohr, einem Saugrohr und einem Flüssigkeitsbehälter. Das Druckrohr ist am Ende verengt zu einer kleinen Düse. Dadurch werden die Luftstromlinien verdichtet, und ein Sog entsteht. Die Folge ist ein Unterdruck in der Düse und noch ein Stück vor ihr. In diesen Unterdruckbereich ragt das Saugrohr; es leitet die Flüssigkeit nach oben. Sie wird zerstäubt, sobald sie in den Druckluftstrom gerät; das ist die zweite Aufgabe des Stromes.



Zerstäuber-Wirkungen

Die Anordnung entsprechend der obenstehenden Abbildung ist leicht aus Glasröhrchen nachzubauen; man kann auch in einer Farbenhandlung einfache Zerstäuber billig kaufen. Blasen wir in das Druckrohr, so zeigt der Druckmesser Unterdruck an. Wir dürfen dabei nicht so stark blasen, daß die Meßflüssigkeit zerstäubt! Das ist zwar eindrucksvoll, aber unzumutbar.

In der gleichen Weise wirkt auch unsere Wasserstrahl-Luftpumpe – nur daß bei ihr ein lotrechter Wasserstrahl den Unterdruck hervorruft. Weitere Anwendungen haben wir im Bunsenbrenner, in der Kessel-Speisewasserpumpe (Injektor), beim Vergaser in Kraftfahrzeugen, in Schornsteinen (bei Wind) und beim Heber für giftige Flüssigkeiten.

Warum steigt ein Flugzeug?

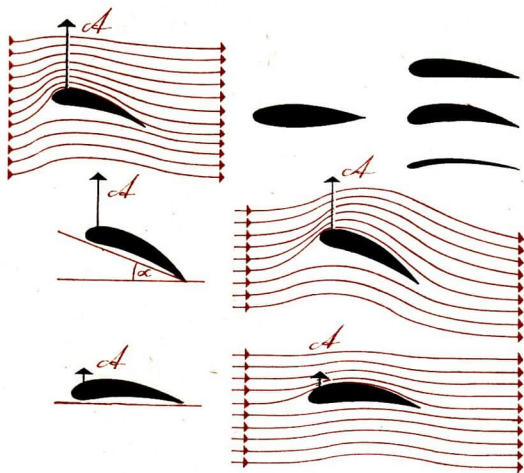
Nach allem, was wir bisher behandelt haben, ist die Antwort nicht mehr schwer. Die beiden Tragflächen links und rechts am Rumpf tragen das Flugzeug mit Hilfe eines besonderen Profils (Querschnitts). Es ist ein Stromlinienprofil. In der Luftströmung (relativ zum Flugzeug) werden die Stromlinien oberhalb des Profils zusammengedrängt; die Strömungsgeschwindigkeit wird dadurch größer – ein Sog entsteht.

An der Unterseite geschieht das Gegenteil. Die Stromlinien werden auseinandergezogen; die Geschwindigkeit nimmt ab, und der Ruhedruck steigt. Sog von oben und Druck von unten ergeben eine Kraft, die senkrecht nach oben gerichtet ist – den *dynamischen Auftrieb*. Zwei Drittel Anteil daran hat der Sog, ein Drittel der Druck. Der dynamische Auftrieb hängt nicht nur vom Profil ab, sondern auch von dem Winkel, unter dem das Profil

umströmt wird, dem *Anstellwinkel*. Wird der Anstellwinkel zu groß, so bilden sich Luftwirbel, und der dadurch entstehende Energieverlust vermindert den Auftrieb.

In wissenschaftlichen Instituten werden die besten Profilformen experimentell in Strömungskanälen ermittelt – nicht nur für Flugzeuge, sondern auch für die Verkehrsmittel zu Wasser und zu Lande. Die untenstehende Abbildung zeigt einige wichtige Profilformen. Wir wollen nun versuchen, den dynamischen Auftrieb zu messen.

Profile und ihr Verhalten in der Strömung



Der dynamische Auftrieb

Zunächst ein kleiner Vorversuch: Wir fassen ein Blatt Schreibmaschinenpapier Format A4 an den unteren beiden Ecken mit Daumen und Zeigefinger. Die beiden Mittelfinger spreizt man so, daß das Blatt zu ihnen ansteigt und mit einer Wölbung über sie hinabfällt. Blasen wir scharf waagrecht über die Wölbung hinweg, so wird das Blatt durch den dynamischen Auftrieb gehoben. Hierbei knickt es meist in der Längsrichtung ein und bleibt dann so stehen.

Es geht auch so: Wir kleben einen Papierstreifen, 20 cm mal 3 cm, mit den Enden spitz zusammen und biegen ihn in eine Form, die dem Tragflächenprofil ähnelt. Diese Schlinge legen wir mit der Wölbung über einen Bleistift, halten die Klebestelle waagrecht dazu und blasen das Ganze an. Während der Luftströmung hält sich die Schlinge durch den Auftrieb allein waagrecht.

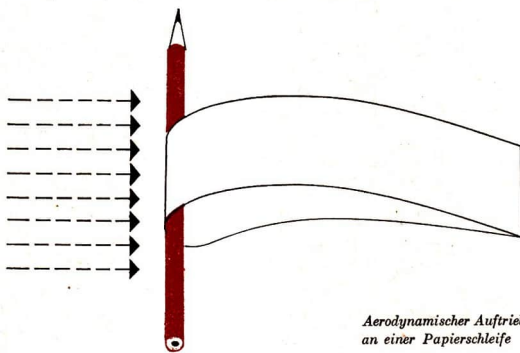
Wir bauen ein Meßgerät

Aus einem leicht beweglichen Hebel und einem Zugkraftmesser bauen wir uns nach der nebenstehenden Abbildung ein Meßgerät für den aerodynamischen Auftrieb.

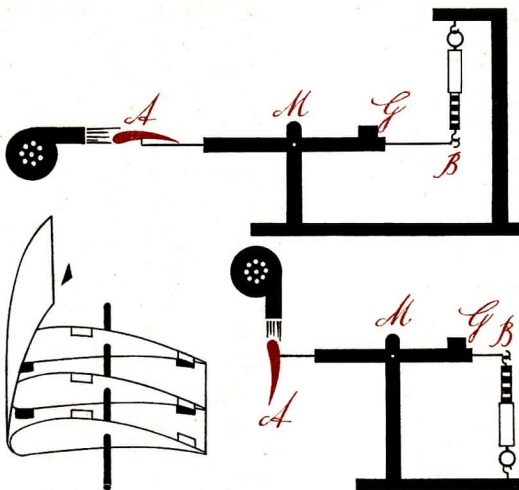
Es ist eine *Einkomponentenwaage*, denn sie mißt nur den Auftrieb als eine Komponente.

G ist ein kleiner Körper zum Ausgleich des Gewichts des Tragflügelmodells. Die Längen AM und MB müssen genau gleich lang sein; andernfalls müssen wir nach dem Hebelgesetz umrechnen. An Stelle des Zugkraftmessers (oben) können wir bei B unten einen Druckkraftmesser benutzen; wir vermeiden dann die Aufhängevorrichtung. Blasen wir das Profil mit unserem Haartrockner an, so zeigt der Kraftmesser den Auftrieb in p an. Den Anstellwinkel verändern wir dann mehrmals und messen jedesmal erneut.

Das Tragflächenmodell kneten wir aus Plastilin oder kleben es aus glattem Schreibpapier (als Besspannung) und drei Papprippen mit Falzen. Ein dünner Holzstab versteift das ganze Modell. Wir messen die Antriebswerte unter verschiedenen Anstellwinkeln (bis zur Wirbelbildung) und tragen die Werte in eine Zahlentafel ein.



*Aerodynamischer Auftrieb
an einer Papierschleife*



Versuche mit der Einkomponentenwaage

Wir messen den Luftwiderstand

Die hierfür geeignete Einkomponentenwaage bauen wir ähnlich wie die vorhergehende; die Luft strömt diesmal von oben. Aus Plastilin können wir alle möglichen Körper formen und deren Luftwiderstand messen.



Moleküle und Bewegung

Von der Wärme

Wir haben an verschiedenen Stellen von der Wärme gehört. Sie entsteht beispielsweise bei jeder Bewegung durch Reibung; mechanische Energie, die dabei verlorengeht, tritt plötzlich in Form von Wärme wieder auf. Der kluge Mensch gibt sich mit den einfachen Tatsachen nicht zufrieden, sondern fragt: „Was ist das für eine merkwürdige Angelegenheit mit dieser Wärme, die überall auftaucht?“ Einmal brauchen wir sie dringend; da geben wir uns viel Mühe, sie zu erzeugen, und wir bewahren sie in dämmenden Hüllen sorgfältig auf – ein andermal ist sie uns höchst unwillkommen, und wir versuchen sie schnellstens an die Umgebung loszuwerden.

Auf jeden Fall ist die Wärme eine der häufigsten und wichtigsten Erscheinungen unseres gesamten Lebens, und es lohnt sich, sie etwas näher zu betrachten und über sie nachzudenken.

Energie wird verwandelt

Den Zusammenhang von Wärme und Bewegung haben die Menschen beim Feuerbohren, Feuerschlagen und beim Hämmern von Metallstücken, die dabei warm wurden, schon sehr früh erkannt. Der umgekehrte Vorgang – die Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische – zeigte sich, als verschlossene Gefäße mit siedendem Wasser durch den Dampfdruck (also eine durch Wärmeeinfluß entstandene mechanische Kraft) zersprangen; seit der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts nutzt man diese Erfahrung in der Dampfmaschine aus. Aus diesen Forschungen entwickelte sich folgerichtig die ganze Lehre von den Beziehungen zwischen den verschiedenen Formen der Energie (deren Summe immer gleichbleiben muß!): zwischen mechanischer und chemischer Energie, Wärme, Licht, Magnetismus und Elektrizität. Immer mehr solcher Zusammenhänge zu finden, immer mehr Erscheinungen und Wirkungen auf ein und dieselbe Ursache zurückzuführen ist eine der Hauptaufgaben der Forschung in der Naturwissenschaft.

Diese grundlegenden Erkenntnisse wurden im *ersten Hauptsatz* der Wärmelehre niedergelegt: *Mechanische Arbeit und Wärme sind zwei Energieformen, die sich in einem bestimmten Verhältnis ineinander umwandeln (überführen) lassen.* Bei allen Umwandlungen zwischen diesen Energien bleibt die Summe der Energiebeträge erhalten. Dieser „Satz von der Erhaltung der Energie“ ist nicht auf mechanische Vorgänge beschränkt. Erhitzen wir einen Körper (etwa durch Reibung), so beginnt er schließlich zu glühen; er sendet Licht aus – er strahlt. Diese Strahlung entsteht in der Substanz und wirkt auch wieder (in verschiedener Weise) auf Substanzen; bestrahlte Körper, vor allem mit dunkler und rauher Oberfläche, setzen die Strahlung wieder in Wärmeenergie um. Ein besonders einfacher Versuch soll nachweisen, wie sich aufgewendete mechanische Energie in Wärme umsetzt und wie Entspannung kühlt.



Das warme und das kalte Gummiband

Wir halten ein kräftiges Gummiband („Schnipsgummi“) zwischen beiden Zeigefingern locker an die Lippen; es hat Zimmertemperatur. Plötzlich ziehen wir es stark auseinander – und merken, daß es wärmer geworden ist; ebenso plötzlich entspannen wir es wieder – das Gummiband ist merklich kühler geworden. – Auch dicker Draht wird warm, wenn man ihn mehrmals hin- und herbewegt.

Das Wesen der Wärme

„Was ist Wärme?“ fragten also die Forscher. Sie befragten die Natur im Experiment; das waren im 17. Jahrhundert vor allem die Engländer Robert Boyle (1627 bis 1691) und Robert Hooke (1635 bis 1703). Im 16. Jahrhundert hatte sich der Engländer Francis Bacon (1561 bis 1626) schon mit dieser Frage befaßt. Sie hatten es nicht leicht, denn die Wärme selbst war und ist ja nicht zu sehen; nur ihre Wirkungen lassen sich beobachten, und daraus müssen Schlüsse gezogen werden und Hypothesen (Annahmen, Vermutungen) aufgestellt werden.

Die Forscher zogen diesen Schluß: *Wärme ist die Bewegung der kleinsten Teilchen der Materie (wir sagen Moleküle), und die Geschwindigkeit dieser kleinsten Teilchen wächst mit zunehmender Temperatur.* Im 18. Jahrhundert ist diese Auffassung dann von dem russischen Naturforscher Michail Wasiljewitsch Lomonossow (1711 bis 1765) und dem Schweizer Daniel Bernoulli (1700 bis 1782) vertreten worden. Wir wissen heute, daß diese Ansicht richtig ist, und erkennen die große Leistung dieser Männer an. Sie ist um so größer, als sich durch die Entwicklung der Chemie im 18. Jahrhundert eine andere Theorie anbot: Die Wärme sei eine gewichtlose materielle Substanz, ein „Wärmestoff“. Beim Reiben zweier Stoffe sollte danach Wärmestoff aus seiner mechanischen oder chemischen Verbindung befreit

werden und die Stoffe erwärmen; man dachte an eine Art chemischer Umsetzung zwischen dem Wärmestoff (auch „Caloricum“ genannt) und dem Stoff des Körpers. Bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts hat sich diese Theorie von der stofflichen Natur der Wärme gehalten; dann ist sie von den ständig wachsenden Beweisen für die Bewegungstheorie verdrängt worden. Der deutsche Arzt Julius Robert Mayer (1814 bis 1878) hat zur Klärung dieser Frage Entscheidendes im Experiment und in der Theorie beigetragen.

Robert Brown entdeckt eine merkwürdige Bewegung

Der englische Botaniker Robert Brown (1773 bis 1858) beobachtete 1827 im Mikroskop feinste Samenkörnchen in einem Wassertropfen. Der Anblick war erstaunlich: Die winzigen Staubeilchen tanzten ununterbrochen hin und her, nach links und nach rechts, nach oben und nach unten; sie „wimmeln“ – die kleinsten stärker als die größeren. Brown konnte diese merkwürdige Wimmelbewegung nicht erklären. Erst Jahrzehnte später ist die richtige Erklärung gefunden worden; 1905 hat Albert Einstein (1879 bis 1955) und 1906 unabhängig von ihm v. Smoluchowski eine quantitative Theorie dafür entwickelt.

Dies ist das Geheimnis der von Brown entdeckten Bewegung: Die Moleküle eines Stoffes sind ständig in ungeordneter Bewegung, in festen Stoffen am schwächsten, in Flüssigkeiten schon stärker und in Gasen am stärksten. Diese „Molekularbewegung“ ist in ihrer Stärke vom Wärmestand (der Temperatur) des Stoffes abhängig. Die Moleküle sind so winzig, daß wir sie auch mit den stärksten Mikroskopen nicht sehen können. Aber die unruhigen Moleküle stoßen dauernd Teilchen in ihrer Nähe an, und diese Teilchen sind manchmal gerade so groß, daß sie sich dann auch bewegen und zugleich im Mikroskop beobachten lassen.

Brown hat also nicht die Bewegung von Molekülen gesehen, sondern das Wimmeln der von den Molekülen angestoßenen Samenkörnchen.

R. W. Pohl hat eine anschauliche Modellvorstellung gegeben: Wir füllen eine Schüssel mit lebenden Ameisen und gehen so weit fort, bis wir deren Krabbewegungen nicht mehr sehen können – nur noch die Schüssel mit irgendeiner Masse darin ist sichtbar. Jetzt streuen wir auf die Ameisen regellos Papierschnitzel, ganz kleine und etwas größere, aber alle größer als eine Ameise. Die Schnitzel können wir vom entfernten Platz aus dann noch unterscheiden, und wir sehen auch, daß sie sich unregelmäßig drehen und bewegen: die größeren schwächer, die kleinen stärker. Die wimmelnde Bewegung der Ameisen, für uns unsichtbar, wird durch die Papierschnitzel stark vergrößert wiedergegeben (in einer Wirkung sichtbar gemacht). Als Versuch ist das schwierig durchzuführen, weil man die Ameisen kaum hindern kann, an der Schüsselwand hochzulaufen.

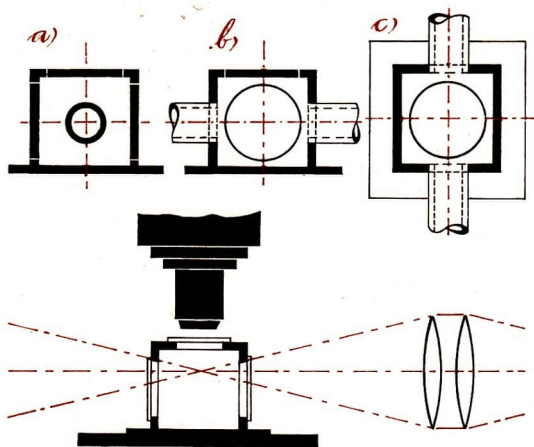
Wir können uns dagegen sehr wohl mit Hilfe eines guten Mikroskops von der Brownschen Bewegung überzeugen. Auch mit Staubteilchen in Gasen können wir sie zeigen – indem wir beispielsweise etwas Zigarettenrauch in einen kleinen Glasbehälter blasen und dann unter dem Mikroskop beobachten.

Wir beobachten die Brownsche Bewegung in Luft

Nötig sind: ein Mikroskop mit etwa 100facher Vergrößerung, eine Rauchkammer und eine Beleuchtungseinrichtung, etwa ein Bildwerfer.

Die Rauchkammer bauen wir aus Sperrholz oder Plastikwerkstoff selbst. Sie ist ein etwa würfelförmiges Kästchen mit einem freien Innenraum von 20 mm mal 20 mm mal 20 mm. Wir fertigen zwei Seitenwände, je 20 mm mal 20 mm groß, außerdem zwei rechteckige Wände, je 20 mm hoch und um die doppelte Dicke der Platten länger als hoch – bei Sperrholz von 4 mm Stärke also 28 mm lang. Die quadratischen Seiten bekommen in der Mitte eine Bohrung von 5 mm Durchmesser; in jede wird ein kurzes Glasrohr fest eingeklebt. Aus den beiden rechteckigen Seitenwänden sägen wir je eine Kreisfläche von etwa 18 mm Durchmesser heraus und kleben über die Öffnungen je ein mikroskopisches Deckgläschen (Kantenlänge 22 mm). Eine Deckplatte für das Ganze, bei 4-mm-Sperrholz 28 mm mal 28 mm groß, erhält die gleiche Kreisöffnung und ebenfalls ein Deckgläschen.

Beobachtungskammer für die Brownsche Bewegung



Die zwei quadratischen Seiten und die zwei rechteckigen werden auf einem dünnen Grundbrettchen so zusammengeleimt, daß ein würfelförmiger Innenraum entsteht; die Deckplatte schließt alles ab. Alle aneinanderliegenden Flächen müssen sehr sauber und luftdicht miteinander verbunden sein; der Innenraum steht nur durch die Glasröhrchen mit der Außenwelt in Verbindung. Zum Verschuß der Röhrchen besorgen wir uns noch zwei kurze Stücke Gummischlauch mit zwei Schlauchklemmen.

Zum Versuch stellen wir das Kästchen auf den Objektisch unseres Mikroskops (Tubus genügend anheben!); die vom Bildwerfer kommenden Lichtstrahlen sollen genau in der Mitte der Rauchkammer (in der optischen Achse des Mikroskops) möglichst dicht unter dem oberen Deckgläschen zusammentreffen (konvergieren). Der untere Teil der Abbildung auf Seite 141 zeigt die Anordnung; die Glasröhrchen sind nicht angedeutet. Wenn das vorhandene Mikroskop für die angegebene Rauchkammer nicht genügend Platz hat, müssen wir die Maße entsprechend verkleinern.

Wir opfern als Nichtraucher der Wissenschaft ausnahmsweise eine Zigarette und blasen etwas Rauch durch eines der Glasröhrchen in das Innere des Kästchens – selbstverständlich ohne dabei den Rauch in die Lungen zu ziehen. Ist das Kästchen gefüllt, verschließen wir beide Röhrchen durch Schlauchstücke mit Quetschhahn oder durch kleine Korken. Wir warten eine Weile, bis sich die durch das Einblasen entstandene Wirbelbewegung gelegt hat; dann stellen wir das Mikroskop genau auf den Konvergenzpunkt (Schnittpunkt) der Lichtstrahlen ein. Wenn alles richtig ausgeführt worden ist, läßt sich die unregelmäßige (zickzackförmige) Brownsche Bewegung der Rauchteilchen gut erkennen.

Wir wissen: Die Rauchteilchen sind durch die bewegten Luftmoleküle angestoßen worden. Diese sind für uns nicht sichtbar, weil sie zu winzig sind. Deshalb begnügen wir uns mit der Folge der Molekularbewegung: der Bewegung der angestoßenen Rauchteilchen. Der Zusammenhang ist so eng und eindeutig, daß uns der Beweis genügt.

Wir beobachten die Brownsche Bewegung im Wasser

Dieser Versuch ist einfacher als der vorhergehende, erfordert aber ein Mikroskop mit 200- bis 500facher Vergrößerung. Außerdem sind nötig: etwas Tusche (oder Milch), ein kleines Becherglas, Wasser, Rührstäbchen, Filterpapier.

In das Becherglas mit Wasser bringen wir etwas Tusche, so daß die Lösung noch schwach gefärbt ist. Von dieser Lösung übertragen wir mit dem Rührstab einen kleinen Tropfen auf den Objektträger und legen ein Deckgläschen vorsichtig schräg darauf, so daß keine Luftbläschen eingeschlossen werden. Die beim Niedersinken des Deckglases verdrängte Flüssigkeit wird mit Fließpapier abgesaugt, bis das Deckglas fest auf dem Objektträger haftet – je dünner die Lösungsschicht zwischen den Gläsern, desto besser! Nunmehr beobachten wir in der üblichen Weise. – Dieser „fast klassische“ Versuch ist vor allem für die Nichtraucher unter uns geeignet.

Wärme dehnt die Körper aus

Wir haben zwar die Moleküle selber nicht gesehen – aber die Wirkung auf ihre nächste Umgebung läßt den Schluß zu: Die Moleküle bewegen sich. Auch durch andere Beobachtungen sind die Forscher darauf gekommen. Die Moleküle eines festen Körpers sind durch starke Kräfte, durch die molekulare Bindungskraft, die Kohäsion (vom lateinischen *cohaerere* = zusammenhängen), miteinander verbunden. Führt man dem Körper Wärme zu, so dehnt er sich aus. Das Gefüge der Moleküle wird gelockert. Bei weiterer Wärmezufuhr schmilzt der feste Körper und verdampft schließlich; er wird zu Gas. Auch Flüssigkeiten und Gase dehnen sich bei Erwärmung aus; sie üben im verschlossenen Gefäß (etwa die Luft im Fahrradschlauch) einen größeren Druck auf die Gefäßwand aus. Dabei tritt eine Expansion auf (vom lateinischen *expādere* = sich ausdehnen). Druck auf die Gefäßwand – das bedeutet Kraft in Richtung auf die Gefäßwand; notwendigerweise muß das Gas gegen die Wand stoßen und daher in Bewegung sein. Mit höherer Temperatur wird die Ausdehnung und damit der Druck stärker; also muß mit steigender Temperatur die Bewegung der Moleküle stärker werden. Wir können schließen: Wärme ist eine Energie, durch die sich die Moleküle gegen die Bindungskräfte zwischen den Molekülen bewegen; je mehr Wärme, desto mehr Bewegung, desto schwächer wirken sich die Bindungskräfte aus. Da wir alles, was mit Bewegung zu tun hat, gern „kinetisch“ nennen (Kinematograph, auch Cinema!), sprechen wir hier von der molekular-kinetischen Theorie der Materie und der Wärme, von der *kinetischen* oder *mechanischen Wärmetheorie*.

Auch in festen Körpern bewegen sich die Moleküle – freilich um eine mittlere Ruhelage. In Flüssigkeiten und Gasen ist die Bewegung wesentlich größer und freier; hier bewegen sich die Teilchen nach anderen Stellen hin – sogar gegen die Wirkung der Schwerkraft. Auf diese Weise verteilen sich die aufgelösten Zuckerteilchen selbständig im Kaffee und Riechstoffe in ruhender Luft; man nennt das *Diffusion* (vom lateinischen *diffusus* = verbreitet). Und schließlich erklärt die Bewegung der Moleküle noch die Tatsache, daß die Gase unserer Lufthülle nicht auf die Erde fallen! Die Schwerkraft zieht sie zwar zur Erde; aber die fallenden Gasmoleküle werden ebensooft durch Zusammenstöße mit anderen Molekülen gebremst oder nach oben gestoßen. Fallbewegung und Wärmebewegung ergeben eine Resultierende: die beständige Atmosphäre.

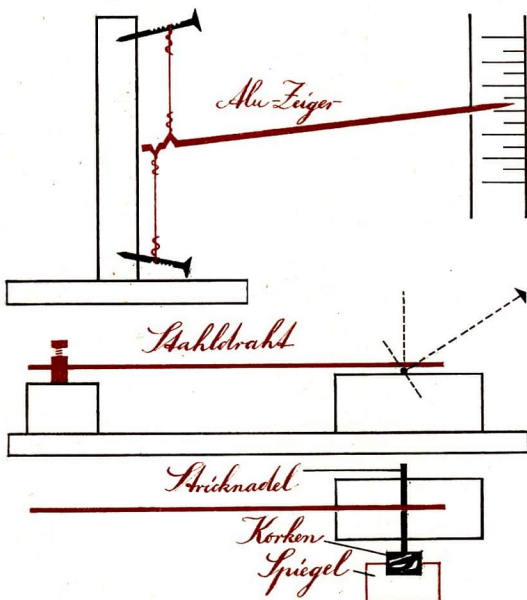
Wir wollen die lineare (in einer Richtung laufende) Ausdehnung von Metallen in Abhängigkeit von der Temperatur an zwei Versuchen kennenlernen. Später werden wir sie beim Hitzdraht-Meßgerät für elektrische Messungen ausnutzen (siehe Seite 218).

Die dehnbare Geigensaite

Entsprechend der Abbildung auf der nächsten Seite schlagen wir in eine senkrecht auf einem Grundbrett angeordnete Holzleiste zwei Nägel

schräg ein; die Nägel erhalten (mit einer Dreikantfeile) Kerben. An einem dünnen Stahldraht von oben und einem gleichen von unten hängt ein Zeiger aus Aluminiumdraht; er spielt über eine Skale (rechts). Der Stahldraht soll möglichst dünn sein (beispielsweise Stahl-e-Saite einer Geige). Damit die beiden Stahldrähte auf dem Zeiger nicht abrutschen, kerbt man den Aluminiumdraht ebenfalls ein oder biegt ihn dicht nebeneinander links einmal nach unten und einmal nach oben im Winkel durch. Je näher die beiden Stahldrähte aneinandersitzen, desto empfindlicher ist die Einrichtung. Es kommt nicht so sehr darauf an, daß der Zeiger besonders leicht ist; die Ausdehnung ist eine Molekularkraft, die ganz andere Kräfte überwindet! Nähern wir einem Stahldraht ein brennendes Streichholz, einen warmen LötKolben oder gegebenenfalls auch nur die warme Hand, so ist ein deutlicher Ausschlag zu beobachten. Wir können es auch einmal mit einem Stückchen Eis probieren. Der Zeiger muß dann nach der anderen Seite ausschlagen. Unser Draht zieht sich zusammen.

Die Wärmeausdehnung wird angezeigt



Der Lichtzeiger ist empfindlicher

Die zweite Anordnung erinnert an die Walzenlager, die von den Brückenbauern unter dem einen Ende der Brücke angebracht werden, damit die Längenausdehnung der Stahlbrücke aufgefangen wird. Ein Stahldraht (beispielsweise eine Fahrradspeiche) von etwa 2 mm Durchmesser wird an einem Ende befestigt; am anderen Ende liegt er senkrecht auf einer Stricknadel. Die Stricknadel trägt an einem Ende einen Kork; im Kork steckt entweder eine weitere Stricknadel (senkrecht zur ersten) oder ein kleiner Taschenspiegel. Dehnt sich der Stab aus, so dreht er die liegende Nadel und damit auch den Zeiger oder den kleinen Spiegel. Wenn wir einen Spiegel eingebaut haben, brauchen wir noch einen möglichst scharfen, hellen Lichtstrahl (aus einer Projektionslampe, notfalls genügt eine Taschenlampe). Mit dem Lichtzeiger erhalten wir eine größere Empfindlichkeit; kleinste Ausdehnungen werden durch den langen Lichtstrahl deutlich angezeigt. Damit der Stahlstab die Stricknadel gut rollen läßt, kann man ihn beschweren oder etwa durch eine Gummischur andrücken.

Dieses Gerät arbeitet sehr empfindlich; eine unter den Stahlstab gehaltene Hand oder Behauchen läßt den Zeiger schon wandern. Verdunstungskälte (durch etwas Benzin, Äther oder Alkohol, mit dem Pinsel schnell aufgestrichen) zieht den Stahlstab zusammen, und der Zeiger geht in die andere Richtung.

Bei dieser Gelegenheit kann man zeigen, daß sich Holz in der Längsrichtung nicht ausdehnt und Gummi sich sogar beim Erwärmen zusammenzieht. Man spannt statt des Stahlstabes einen Holzstab und schließlich ein Gummiband ein.

Auch Luft dehnt sich beim Erwärmen aus

Nicht nur Metalle, sondern auch Flüssigkeiten und Gase dehnen sich beim Erwärmen aus; beispielsweise arbeiten alle mit Quecksilber und Alkohol gefüllten Thermometer in dieser Weise. Wir wollen einen kleinen Versuch mit der Ausdehnung der Luft machen. Eine Bemerkung vorweg: Das kleine Barometer von Seite 118 läßt sich auch hierfür verwenden; wir nehmen die Flasche aus ihrer Wärmedämmung heraus und schließen sie in die warmen Hände. Der Tropfen in dem waagerechten Glasrohr wandert!

Wir streifen einen kleinen, luftleeren Luftballon über die Öffnung einer leeren Flasche. Stellen wir die Flasche in heißes Wasser, so dehnt sich die Luft in der Flasche aus und füllt auch den kleinen Ballon. Mit einer Seifenblase läßt sich der Versuch ebenfalls gut durchführen.

Wasser ist ein merkwürdiger Stoff

Wasser benimmt sich „anomal“, also anders als die übrigen Stoffe. Das ist gut so, denn sonst würden wir keine Fische mehr fangen und essen können, die Meere würden vom Nordpol und Südpol her zu Eis werden, und das

Leben in vielen Ländern wäre durch große Kälte recht schwierig. Das ausgefallene Verhalten des Wassers verursacht allerdings auch die vielen Wasserrohrbrüche und sprengt Bäume auseinander.

Normalerweise dehnen sich feste, flüssige und gasförmige Körper bei Erwärmung aus und ziehen sich bei Abkühlung immer weiter zusammen – bis zum „absoluten Nullpunkt“ von minus 273,15 °C, auch 0° Kelvin genannt. Die Bewegung der Moleküle wird dabei immer geringer und hört schließlich auf; dadurch erhalten die Stoffe sehr merkwürdige physikalische (zum Beispiel magnetische und elektrische) Eigenschaften. Am absoluten Nullpunkt haben die Stoffe ihre größte Dichte, also das kleinste Volumen bei gegebener Masse. Das Volumen eines idealen Gases schrumpft bei jedem Grad Abkühlung um 1/273.

Das Wasser, einer der lebenswichtigsten Stoffe der Erde, macht das nicht mit, sondern hat bei 4 °C seine größte Dichte, das heißt seine kleinste Ausdehnung. Von da dehnt es sich allemal aus – ganz gleich, ob man es erwärmt oder weiter abkühlt. Eis hat also eine kleinere Dichte als flüssiges Wasser; es ist daher auch leichter und schwimmt oben. Wasser dehnt sich beim Gefrieren um 1/11 seines Volumens aus! In manchen Gegenden gießt man bei Frost Wasser in Felsritzen und sprengt mit dem gefrierenden Wasser die Felsen auseinander; das Verfahren war schon im Altertum bekannt. Im kleinen lockert das gefrierende Wasser die Ackerkrume – eine für das Leben auf der Erde sehr wichtige Erscheinung.

Weil das Eis auf dem Wasser schwimmt, schützt es dieses vor der Kälte. Außerdem sinkt das Wasser von +4 °C stets auf den Grund, weil es bei dieser Temperatur die größte Dichte hat, also am schwersten ist. Andernfalls säne das Eis in die Tiefe der Gewässer; Meere, Seen und Flüsse würden allmählich völlig vereisen und auch im Sommer nicht mehr auftauen können; die Fische stürben aus.

Man sagt, die Eisberge ragten nur zu einem Zehntel ihres Volumens aus dem Wasser heraus. Das stimmt nicht ganz, weil das Eis nicht durchgehend fest ist, sondern allerlei Lufteinschlüsse hat, die den Auftrieb verstärken. Aber vier Fünftel bis drei Viertel liegen tatsächlich unter Wasser – oft viel weiter ausgedehnt als die Teile über Wasser. Das ist eine große Gefahr für die Schifffahrt; denken wir nur an die wegen ihres Ausmaßes und der Begleitumstände sehr bekannt gewordene Katastrophe der „Titanic“.



Die Eissäge

Wir sprengen mit Wasser

Das ist ein Versuch für die Winterzeit: Wir füllen eine Bierflasche ganz voll Wasser und verschließen sie fest; dann wird sie in den Frost hinausgestellt. Die Flasche zerspringt unter dem Druck des gefrierenden Wassers. Bei offenen wassergefüllten Flaschen kann man gelegentlich beobachten, daß sich das Eis in Form einer Stange aus der Öffnung schiebt.

Steter Druck sägt des Eis

Auf zwei Böcke, Stuhllehnen oder Tischkanten legen wir ein Stück Eis von 0 °C. Es muß mindestens so groß wie ein Ziegel sein; wir können auch einen

ganzen Eisblock oder ein unregelmäßig geformtes Stück nehmen. Um den Eisblock wird eine dünne Stahldrahtschlinge gelegt, die ein Massestück von 5 kg bis 10 kg trägt; ein großer Block verträgt 10 kg. Und nun können wir die ganze Sache dem naturgesetzlichen Ablauf überlassen. Das Ergebnis ist verblüffend: Die Drahtschlinge rutscht allmählich durch den ganzen Querschnitt des Eisblocks; sie „schmilzt sich hindurch“, ohne daß sie irgendwie erwärmt wird. Oberhalb des Drahtes frieren beide Eisteile sofort wieder zusammen. Die Erklärung liegt nahe: Das muß mit dem Druck des Drahtes auf das Eis zu tun haben! Wir wissen, daß das Volumen fast aller Stoffe kleiner wird, wenn sie vom flüssigen in den festen Zustand übergehen; ihre Moleküle rutschen enger zusammen. Ein Druck von außen fördert dieses Festwerden und erhöht den Schmelzpunkt. Wasser, dieser merkwürdige Stoff, macht auch hier wieder eine Ausnahme: Da sich sein molekulares Gefüge beim Gefrieren auflockert (das Volumen wird größer!), sinkt der Schmelzpunkt bei Druckerhöhung.

Der Physiker hat ausgerechnet, daß der Schmelzpunkt bei 1 at Druck (1 kp/cm^2) um $0,0075^\circ\text{C}$ sinkt. Bei einem Massestück von 10 kg haben wir etwa 10 kp Gewicht. Ist der Draht 1 mm dick, so ergibt das einen Druck von etwa 100 kp/cm^2 (beim Draht wird nicht die Oberfläche, sondern der Längsschnitt gerechnet; siehe Luftdruck auf die Magdeburger Halbkugeln!). Wir errechnen eine Schmelzpunktsenkung von $0,0075 \cdot 100 = 0,75^\circ\text{C}$. Sehr überzeugend ist das nicht; vermutlich treten hier noch weitere Druckwirkungen auf.

Die Aggregatzustände

Wir kennen sie alle drei: den festen, den flüssigen und den gasförmigen Zustand der Körper; wir wollen sie aber einmal mit dem „geistigen Auge“ in ihrem inneren Aufbau betrachten. Im festen Körper liegen die Atome (und damit die Moleküle) am dichtesten nebeneinander; sie bewegen sich nur wenig um eine mittlere Lage; diese mittleren Lagen sind streng geordnet und festgelegt. Das ist eine Voraussetzung für die Bildung von Kristallen. W. Gerlach spricht von einer „Fernordnung“, weil die Atome über eine größere Strecke geordnet sind.

Wird von außen laufend Energie zugeführt, so wird die Molekularbewegung immer größer, die feste Ordnung löst sich weitgehend auf – der Körper schmilzt. Noch sausen die Moleküle nicht völlig regellos umher; die Flüssigkeit bleibt noch in „Nahordnung“ im Gefäß, und ihre Moleküle hängen zusammen – wenn auch längst nicht mehr so eng und fest wie im festen Körper. Die zugeführte Energie, die diese Umwandlung verursacht, nennt man *Schmelzwärme*. Mit weiterer Wärmezufuhr, der *Verdampfungswärme*, sprengen wir auch die „Nahordnung“ der Moleküle; die Flüssigkeit wird zu Gas, in dem die Moleküle völlig regellos durcheinanderlaufen und nach jeder offenen Seite entweichen.

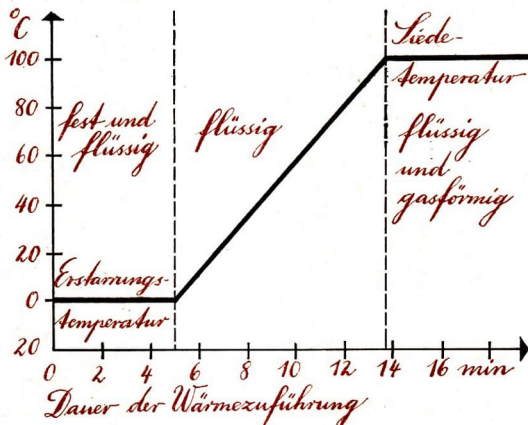
Schmelzwärme und Verdampfungswärme sind Wärmemengen, bezogen auf die Masse des Körpers; die Maßeinheit ist Kilokalorie je Kilogramm (kcal/kg). Wir erinnern uns: 1 kcal ist die Wärmemenge, die den Wärmestand (die Temperatur) von 1 kg Wasser um 1 °C erhöht. Um 1 kg Eis von 0 °C in 1 kg Wasser von 0 °C zu verwandeln, muß ich eine Wärmemenge von 80 kcal zuführen; 539 kcal sind nötig, um 1 kg Wasser von 100 °C in Dampf von 100 °C zu überführen. Das ist sehr viel – sehr zum Kummer aller Erbauer von Wärmekraftwerken!

Freilich geht im Haushalt der Natur nichts verloren. „Rückwärts“ – bei der Umwandlung von Dampf in Wasser beispielsweise – wird die gleiche Wärmemenge wieder frei; nach diesem Naturgesetz arbeitet jede Dampfheizung. Auch beim Gefrieren von Wasser wird eine bestimmte Wärmemenge frei, 80 kcal je 1 kg Wasser. Manche Leute stellen deshalb im Winter Gefäße mit Wasser in den Keller. Bei starkem Frost gefriert das Wasser und gibt dabei Wärme ab.

Die Aggregatzustände des Wassers

In einem Gefäß mischen wir Wasser mit Eis, bis das eingetauchte Thermometer genau 0 °C anzeigt, einige Eisstückchen sollen noch im Wasser schwimmen. Jetzt erhitzen wir das Gefäß gleichzeitig, rühren das Wasser ständig um und messen die Temperatur in regelmäßigen Zeitabständen

Temperaturverlauf bei gleichbleibender Wärmezuführung



(etwa jede Minute oder alle 2 Minuten) bis zum Sieden des Wassers; die Werte tragen wir in ein Koordinatensystem ein. Die so gewonnene Kurve zeigt die Abhängigkeit der Temperatur einer bestimmten Wassermenge von der Dauer der Wärmezufuhr.

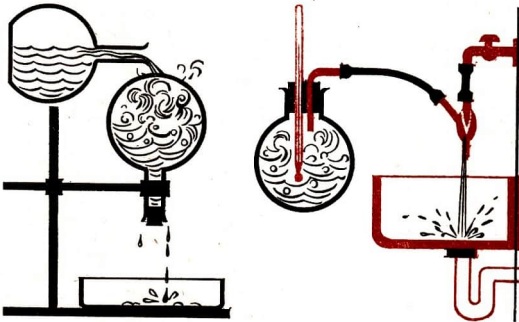
Man sieht aus der umstehenden Abbildung, wie die Temperatur bei 0°C stehenbleibt, solange noch Eisstückchen im Wasser schwimmen; während dieser Zeit wird die zugeführte Wärme völlig für das Schmelzen des Eises verbraucht. Dann kommt der ansteigende Teil der Kurve – bezeichnenderweise eine Gerade. Schließlich siedet das Wasser, und nun wird die zugeführte Wärmemenge ganz für das Verdampfen des Wassers in Anspruch genommen.

Es ist reizvoll, anschließend eine gleiche Kurve für die halbe und die doppelte Wassermenge aufzunehmen.

Sieden bei vermindertem Druck

Beim vorhergehenden Versuch haben wir normalen Luftdruck (760 Torr) angenommen; da siedet das Wasser bei 100°C . Ist der Luftdruck größer, so lösen sich die Moleküle schwerer aus dem „Nahverband“ der Flüssigkeit, weil die Luftmoleküle den Weg versperren. Ganz anders bei geringerem Luftdruck (den wir ja schon kennengelernt haben): Hier entschlüpfen die Wassermoleküle leichter in den „Dampfraum“. Wir brauchen die Moleküle dann nicht mehr durch Erhitzen auf 100°C auf den „vollen Schwung“ zu bringen; das Wasser siedet schon bei Temperaturen unter 100°C . (Etwas zum Sprachlichen: Eine Flüssigkeit „siedet“; wir „kochen“ dagegen die

Wasser siedet unter vermindertem Druck



Flüssigkeit! Der Ausdruck „Siedepunkt“ ist richtig; aber eine Flüssigkeit kann niemals kochen.)

Bergsteiger können auf hohen Bergen Fleisch und Eier nicht garkochen, weil die Temperatur nicht hoch genug ist; sie müssen fest verschlossene Gefäße (mit Sicherheitsventil!) nehmen, in denen der Dampfdruck den fehlenden Teil des Luftdrucks ersetzt. Solche Gefäße benutzen unsere Hausfrauen gelegentlich zum Schnellkochen: Der Dampfdruck geht über 760 Torr hinaus, die Temperatur steigt entsprechend über 100 °C an, und das Fleisch wird schneller gar als sonst. Ein bewährtes Verfahren für eilige Leute!

Wir wollen das nachprüfen, ohne indes auf den Chimborasso zu steigen; wir nehmen das Prinzip, das wir schon bei dem zerschmetterten Kanister (siehe Seite 120) benutzt haben. Ein fester Rundkolben (niemals ein Stehkolben oder Erlenmeyerkolben! Nur Rundkolben widerstehen dem Luftdruck und „implodieren“ nicht!) wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt; dieses wird zum Sieden gebracht. Der Wasserdampf verdrängt bald die Luft aus dem Kolben. Ist die obere Kolbenhälfte ganz mit Dampf gefüllt, wird der Kolben von der Flamme genommen und im selben Augenblick mit einem Stopfen luftdicht verschlossen. Das Sieden hört sehr schnell auf.

Nun wird der Rundkolben mit dem Hals nach unten irgendwo – etwa in einem Stativ – befestigt. Wir gießen kaltes Wasser auf den Kolben und erleben, wie das Wasser – sicherlich unter 100 °C heiß – wieder zu sieden beginnt! Was ist geschehen?

Durch die kalte Dusche hat sich der Wasserdampf im Kolben kondensiert – wenigstens teilweise –, der verringerten Temperatur entsprechend; etwas Dampf bleibt immer über dem Wasser stehen. Durch das Verschwinden eines großen Teils des Dampfes ist der Druck über dem Wasser plötzlich verringert; das Wasser siedet weiter, bis der neuentstandene Dampf das Gleichgewicht wiederhergestellt hat. Gießen wir erneut kaltes Wasser über den Kolben, so wiederholt sich der Vorgang; wir können das mehrmals machen. Am Schluß lassen wir die Luft wieder in den aufrecht gestellten Kolben einströmen.

Man rechnet, daß bis 500 m der Luftdruck je 100 m Höhenunterschied um etwa 10 mm Quecksilbersäule (10 Torr) abnimmt. Bei größeren Höhen, also „dünnere“ Luft, wird der Druckunterschied geringer.

Wir können den Versuch auch so machen: Der Rundkolben bekommt einen Stopfen, durch den ein Thermometer (mit beispielsweise 50 bis 100 °C Meßbereich) und ein Glasrohr geführt sind. Wasser siedet bei locker aufgelegtem Pfropfen – Thermometer zeigt 100 °C. Kolben fortnehmen, Pfropfen fest eindrücken, Außenende des Glasrohrs mit unserer Wasserstrahlpumpe verbinden. Was vorhin das Kondensieren des Dampfes bewirkte, das schafft nun die Pumpe: Der Luftdruck über dem Wasser wird geringer, das Wasser siedet erneut; bei welcher Temperatur – das können wir nun sogar ablesen.

Auch bei diesen Versuchen tragen wir eine Schutzbrille!



Der Weg der Wärme

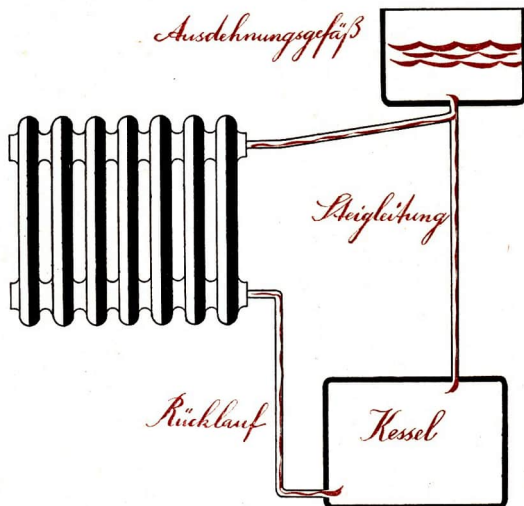
War es bisher zuviel der „grauen“ Theorie? Leider geht es nicht anders; weil die Wärme eine molekulare Bewegungsenergie ist, müssen wir „in Molekülen denken“. Je stärker sich die Moleküle bewegen, desto wärmer ist der Körper – etwa ein Gas. Sicherlich fliegen die Moleküle nicht alle mit gleicher Geschwindigkeit umher, im Gegenteil: Sie stoßen an die Gefäßwand und werden dort zurückgeworfen; sie prallen auch aufeinander und fliegen dann mit anderer Geschwindigkeit in anderen Richtungen weiter. Es geht also alles ziemlich durcheinander – und doch gehört zu einer bestimmten Temperatur eine *mittlere Bewegungsenergie aller Moleküle*; ändert man die Temperatur, so ändert sich auch sofort die Größe der Bewegungsenergie. Diese „Modell-Vorstellung“ von der Wärme ist nicht ganz leicht; aber sie hat den großen Vorteil, daß wir uns damit vieles erklären können, was mit der Wärme zusammenhängt. Zum Beispiel dieses: Wir setzen einen Topf mit Wasser auf die Gasflamme. Was geschieht? Die Topfwand wird wärmer als das Wasser. Die Wassermoleküle stoßen auch an diese Wand, werden zurückgeworfen und erhalten dabei (durch die größere Temperatur der Wand) eine größere Bewegungsenergie als vorher; das Wasser wird wärmer. Da die Summe der Gesamtenergie gleichbleibt, wird die Topfwand entsprechend kälter; ihre Moleküle bewegen sich langsamer – bis wieder Wärmenachschub aus der Gasflamme (chemische Energie) oder einer elektrischen Kochplatte (elektrische Energie) kommt. Das ist die *Wärmeübertragung durch Wärmeleitung*.

Wir wissen, daß die Wärmeleitung in verschiedenen Werkstoffen verschiedenen schnell vor sich geht, in Metallen schneller als in „dämmenden“ Stoffen wie Porzellan, Holz oder auch Luft. Gerade die Luft wird in der Bauindustrie zur Wärmedämmung benutzt; man schafft zu diesem Zweck geschlossene Lufträume in den Bauteilen (Hohlziegeln, Platten usw.).

Wärme breitet sich auch durch Strömung aus

Flüssigkeiten und Gase sind im allgemeinen schlechte Wärmeleiter, aber sie können Wärme sozusagen aufladen, mit sich nehmen und an anderer Stelle wieder abladen. Wir kennen das vor allem von der Heizung her. Die untenstehende Abbildung zeigt die Anordnung einer Warmwasserheizung. Das Wasser nimmt im Kessel die Wärmeenergie auf und gibt sie möglichst wenig an die Leitungen und möglichst stark an die Heizkörper wieder ab. Molekular gesehen heißt das: Die Wassermoleküle erhalten im Kessel eine große Bewegungsenergie; das Wasser wird heiß, dehnt sich aus und strömt nach oben. Auf dem Umlauf durch das Haus wird die Energie an die benachbarte Luft abgegeben.

Jetzt beginnt der zweite Kreis der Wärmeströmung: die Strömung mit Hilfe der Luft. Eine gute Heizung saugt die kalte Luft im Zimmer vom Fußboden weg. Ein Heizkörper vor dem Fenster drückt die durch die Ritzen eindringende Kaltluft nach oben und sorgt für gute Vermischung. Eine brennende Kerze flackert im Winter an der offenen Zimmertür unten nach innen (kalte Luft strömt ein) und oben nach außen (warme Luft strömt aus). Es ist schon ein Pech, daß die Zimmer immer erst oben warm werden



Das Prinzip der Warmwasserheizung

– in hohen Räumen kostet das eine Menge Feuerung mehr! Am günstigsten sind daher Heizröhren im Fußboden – und übrigens schon sehr lange bekannt.

Die nach oben strömende warme Luft bewegt auch die bekannten Papierspiralen und Propeller, beispielsweise bei den erzgebirgischen Weihnachtspyramiden.

Nach denselben Naturgesetzen entstehen die Luftbewegungen in der freien Natur, Aufwinde („Thermikblasen“), die der Segelflieger gern aufsucht, um Höhe zu gewinnen.

Und schließlich: Die Wärmestrahlung

Sie ist die dritte und merkwürdigste Art der Wärmeausbreitung. Das Merkwürdige daran ist, daß sich hierbei die Wärme in Form elektromagnetischer Strahlen sehr schnell ausbreitet. Diese Strahlen sind – und benehmen sich auch – wie Lichtstrahlen; sie haben nur einen anderen Wellenlängenbereich.

Was uns hier angeht, ist die Tatsache, daß beim Aussenden und Empfangen der Wärmestrahlen die Farbe und die Beschaffenheit der Körperoberflächen eine ausschlaggebende Rolle spielen; außerdem steigt die Stärke der Strahlung mit der Temperatur des heißen, sendenden Körpers (sogar in der vierten Potenz der absoluten Temperatur). Dunkle und raue Oberflächen strahlen besser aus als weiße und glatte. Das gleiche gilt für die Aufnahme der Strahlen, die sich dann wieder in Wärmeenergie verwandeln: Im Hochsommer und in heißen Ländern trägt man helle Kleidung. Helle Vorhänge und Jalousinen halten die Zimmer kühl; im Orient sind die Häuser meist ganz weiß gestrichen. Weiße, glatte und metallisch blanke Oberflächen werfen die Wärmestrahlen zurück! Kraftwagenfahrer kennen den Unterschied zwischen einer weißen und einer schwarzen Karosserie sehr gut, wenn sie den Wagen eine Weile in der Sonne stehenlassen müssen. Heizkörper jeder Art, auch Ofenrohre, soll man daher möglichst dunkel und rau halten.

Wer es nicht glauben will, mache den folgenden Versuch! Er betrifft zwar nur die Aufnahme der Strahlen (Absorption, vom lateinischen *absorbere* = aufnehmen); aber die Aussendung (Emission, vom lateinischen *emittere* = aussenden) geht nach denselben Gesetzen vor sich.

Gleiche Strahlung – verschiedene Wirkung

Wir stellen zwei gleich große Bechergläser in die Sonnenstrahlen. Beide enthalten ein Thermometer; das eine Glas ist mit Wasser gefüllt, das durch einige Tropfen Milch hell gefärbt wurde, das andere enthält eine möglichst dunkle Flüssigkeit (etwa mit schwarzer Tinte gefärbtes Wasser).

Zunächst haben beide Flüssigkeiten die gleiche Temperatur. Nach einiger Zeit wird die dunkle Flüssigkeit wärmer als die helle; sie hat also mehr Wärmeenergie aufgenommen.



Die tanzende Schlange

Die Strahlung ist eine elektromagnetische Form der Energie, die sich viel, viel schneller als die Wärmeleitung ausbreitet. Das läßt sich leicht nachweisen.

Wärmeleitung und Wärmestrahlung an einer elektrischen Glühlampe

Wir halten unsere Hand dicht an eine Glühlampe (beispielsweise 75 oder 100 Watt), ohne sie zu berühren. Wir schalten ein und spüren praktisch im selben Augenblick die starke Wärmestrahlung in der Hand. Nach etwa einer Sekunde legen wir die Hand an die Glühlampe – der Glaskolben ist noch ganz kalt. Die Wärmestrahlung ist von gleicher Art wie das Licht; sie wird von Glas und Luft (Gasen) durchgelassen. Erst nach einiger Zeit wird durch Wärmeleitung (Anstoßen der benachbarten bewegten Moleküle) die Gasfüllung der Glühlampe und danach auch der Glaskolben warm.



Körper mit verschiedenen Temperaturen

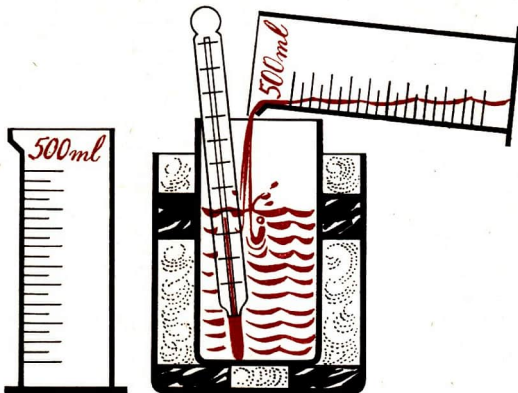
Da sitzen wir in der Badewanne und frieren – das Wasser ist zu kalt. Anstatt die Physik an schwimmenden Seifenschalen, Thermometern und Bürsten (Auftrieb!) selbst zu erleben, drehen wir den Heißwasserhahn auf, voll Vertrauen, daß die Naturgesetze uns wieder helfen. Das heiße Wasser kommt, breitet sich eine Weile (infolge der geringeren Dichte) im oberen Bereich aus und vermischt sich dann wunschgemäß mit dem kalten Wasser; das Bad wird zum Vergnügen.

Wie gut, daß die Wärme stets vom wärmeren auf den kälteren Körper übergeht, niemals aber umgekehrt (daß etwa die Wanne immer heißer und das Wasser immer kälter würde oder ein Teil des Wassers ganz heiß und der Rest wieder ganz kalt)! Diese Erkenntnis gehört zum *zweiten Hauptsatz der Wärmelehre*.

Wir bestimmen eine Mischtemperatur

Wir brauchen dazu ein „Kalorimeter“, das ist ein Gefäß mit guter Wärmedämmung. Am einfachsten, wir nehmen dafür eine Thermosflasche. Man kann auch ein kleineres Becherglas in ein größeres stellen und durch Korkstücke und Watte unten und an den Seiten den Zwischenraum zwischen beiden ausfüllen. Ferner sind nötig: ein Meßglas für 500 ml (cm^3), eines für 250 ml, ein Thermometer für genaues Ablesen.

Wir gießen, als Beispiel, 400 ml Wasser (m_1) in das Gefäß und stellen seine Temperatur (t_1) fest: 20 °C. Wir fügen 200 ml Wasser (m_2) von 60 °C (t_2) hinzu, rühren gut um und messen die Mischungstemperatur t ; es sind



Versuche im Kalorimeter

32,2 °C. Wir wollen das auch berechnen: Das heiße Wasser gibt folgende Wärmemenge Q_2 ab:

$$m_2 \cdot c \cdot (t_2 - t) = 200 \cdot 1 \cdot (60 - t) \text{ cal.}$$

Dabei ist c die „spezifische Wärme“ von Wasser = 1 cal/g · °C. Die spezifische Wärme ist zahlenmäßig gleich der in Kalorien gemessenen Wärmemenge, die nötig ist, um 1 g des betreffenden Stoffes um 1 °C zu erwärmen; daher die Einheit cal/g · °C (Kalorie je Gramm Masse und je Grad Temperaturdifferenz). Die gleiche Wärmemenge wird frei, wenn man 1 g des Stoffes um 1 °C abkühlt. t ist die gesuchte Mischungstemperatur.

Das kalte Wasser nimmt folgende Wärmemenge Q_1 auf:

$$m_1 \cdot c \cdot (t - t_1) = 400 \cdot 1 \cdot (t - 20) \text{ cal.}$$

Beide Wärmemengen sind gleich (es herrscht Gleichgewicht):

$$\begin{aligned} 200(60 - t) &= 400(t - 20) \\ 12000 - 200t &= 400t - 8000 \\ 600t &= 20000 \\ t &= 33,3 \text{ °C.} \end{aligned}$$

Der im Versuch gemessene Wert liegt etwas niedriger, weil das heiße Wasser auch an die Gefäßwand und an das Thermometer Wärme abgegeben hat; bei genauen Messungen muß man diesen „Wasserwert“ des Gefäßes mit berücksichtigen. Bei enger Berührung zweier Körper mit verschiede-

nen Temperaturen ist die vom wärmeren Körper abgegebene Wärmemenge gleich der vom kälteren Körper aufgenommenen Wärmemenge. Die Moleküle des wärmeren Körpers haben mehr Bewegungsenergie und bewegen sich stärker. Bei Kontakt mit dem kälteren Körper geben sie von ihrer eigenen Bewegungsenergie (= Wärme) so viel an die weniger bewegten Moleküle des kälteren Körpers ab, bis diese ebensoviel Energie haben wie die ursprünglich wärmeren Moleküle. Die kälteren, energiearmen Moleküle haben gewonnen, die wärmeren, energiereicheren verloren; beide haben sich auf gleichem Energiestand – irgendwo zwischen den beiden Ausgangswerten – getroffen. Gute *Kältemischungen* sind 100 Gewichtsteile Wasser (kalt) mit 250 Teilen krist. Kalziumchlorid (bis -8°C); je 100 Teile Wasser, Ammoniumchlorid und Natriumnitrat (bis -25°C); 100 Teile Schnee oder zerstoßenes Eis mit 33 Teilen Natriumchlorid (bis -25°C); 100 Teile Wasser mit 150 Teilen krist. Kalziumchlorid (bis -40°C).

Wir lassen Wasser durch Äther gefrieren

Ein nasser Körper wird dadurch kälter, daß die Feuchtigkeit auf seiner Oberfläche verdampft, der Körper also trocknet. Die Medizin benutzt schnell verdampfende (verdunstende) Flüssigkeiten wie Äther und Chloräthyl, um durch starke Kühlung einzelne Körperteile unempfindlich zu machen. Verdampfen – das bedeutet, daß einzelne Moleküle aus dem Zusammenhalt der Flüssigkeit ausbrechen und in den Raum verschwinden. Das können aber nur die Moleküle, die gerade eine besonders hohe Geschwindigkeit haben! Zurück bleiben die langsameren; der Mittelwert der Bewegungsenergie der (übriggebliebenen) Moleküle sinkt, und der Körper wird kälter. Der Siedepunkt von Äther liegt bei 35°C ; er verdunstet also schon bei Zimmertemperatur stark und entzieht dabei seiner Umgebung die Wärme, die er zum Übergang in den gasförmigen Zustand braucht. Das wollen wir ausnutzen, um Wasser gefrieren zu lassen.

In ein schmales Reagenzglas füllt man etwas Äther (Vorsicht! Er ist sehr feuergefährlich!) und steckt das Glas in ein etwas weiteres Reagenzglas mit ein wenig Wasser. Je schneller der Äther verdunstet, um so kälter wird seine Umgebung; wir blasen daher durch einen Gummischlauch Luft durch den Äther. Dadurch kommt er mit mehr Luft in Berührung, und der entstehende Ätherdampf wird fortgedrückt. Nach kurzer Zeit ist das Wasser gefroren. Kälte bedeutet übrigens lediglich Mangel an Wärme.





Ladungen und Felder

Es fing damit an . . .

Es begann damit, daß die alten Griechen ein Stück Bernstein rieben, das in ihrer Sprache „élektron“ hieß. An den geriebenen Stellen hafteten kleine Teilchen – eine damals höchst erstaunliche Tatsache. Lange Zeit hindurch glaubte man im Bernstein eine Kraft erzeugt zu haben, die die Teilchen anzieht. Erst die Versuche im 17. und 18. Jahrhundert ließen erkennen, daß die „Elektrizität“ beim Reiben nicht erzeugt, sondern nur frei gesetzt wird. Auch das Reibzeug (Stoff oder Fell) wird elektrisch geladen. Man entdeckte, daß die Ladungen auf dem reibenden Körper verschiedenartig sind – entgegengesetzter Natur, denn sie gleichen einander beim Zusammenführen wieder zum Ruhestand aus.

Wie wirkt die Reibung?

In nichtleitenden Stoffen (Isolatoren) ruhen gleichgroße *elektrische Ladungen* friedlich nebeneinander, positive und negative, und gleichen einander aus; nach außen tritt daher keine Wirkung auf. Reiben wir aber zwei verschiedene nichtleitende Stoffe aneinander (beispielsweise einen Hartgummistab und ein Fell oder auch mit einem Kamm durch trockenes Haar), dann wird der „Ladungsfrieden“ gestört. Das Reiben bewirkt, daß die Grenzflächen der beiden Stoffe in möglichst großer Fläche ganz dicht, das heißt bis auf „molekularen Abstand“ in der Größenordnung 10^{-10} m einander genähert werden. Dann gibt der eine Körper (der positiv wird) Elektronen an den anderen ab. Sie lagern sich in dessen Grenzfläche an; dieser Körper wird durch den Elektronenüberschuß negativ.

In der Grenzschicht beider Flächen entsteht ein *elektrisches Feld*, eine „Doppelschicht“, mit einer *Berührungsspannung* (Kontaktspannung). Die Feldlinien sind, solange die Grenzflächen aufeinanderliegen, sehr kurz, und die Spannung ist klein. Werden die Flächen voneinander entfernt, das heißt die beiden Körper auseinandergezogen, so verlängern sich die Feldlinien, und die Spannung wird sehr hoch.

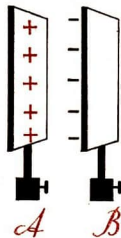
Zwischen verschiedenen geladenen Metallplatten, die isoliert aufgestellt sind, liegen ein elektrisches Feld und eine elektrische Spannung. In der nebenstehenden Abbildung ist die linke Platte durch Berühren mit einem geriebenen Stab aus Glas positiv und die rechte durch Berühren mit einem geriebenen Hartgummistab negativ aufgeladen. Die Metallplatten sind elektrische Leiter; auf ihnen verteilt sich die zugeführte Ladung sofort. Wären die Platten nicht isoliert, so würden die Ladungen sofort in die Erde entweichen, sich dort „neutralisieren“ – und wir hätten das Nachsehen.

Manche Frau wünscht sich eine solche „Erdung“, wenn sich die Unterwäsche oder die Strümpfe aus synthetischen Fasern wegen ihrer unerwünschten elektrischen Aufladung (infolge der unvermeidlichen Reibung beim Aus- und Anziehen) allzu „anhänglich“ zeigen. Das tritt bei allen Kleidungsstücken aus Kunststofffasern auf; beim Ausziehen solcher Pull-over lassen sich im Dunkeln schöne Funken beobachten.

So etwas ist ärgerlich; gefährlich können solche Spannungen durch Reibungselektrizität in der Industrie werden, zum Beispiel beim Herstellen von Stoff- oder Papierbahnen. Beim Verspinnen synthetischer Fasern können gleichnamig geladene Fasern einander abstoßen und sich spreizen; die Folge sind schlechte Stellen im Garn. Das gleiche kann beim Weben mit den Fäden geschehen. Wärme verstärkt die Gefahr noch, weil sie die Stoffe austrocknet und damit zu besseren Isolatoren macht; feuchte Stoffe leiten – ebenso wie feuchte Luft – die Ladung ab. Mehrere hunderttausend Volt entstehen schnell, und wenn die Ladung über einen menschlichen Körper in die Erde abfließt, können trotz der geringen Stromstärke durch den Schock gesundheitliche Schäden entstehen. Man bemüht sich daher, solche unerwünschten Aufladungen durch besondere Erdungen rechtzeitig abzuleiten.

Auch Treibriemen, ja sogar Staubschichten können sich aufladen und durch Funkenentladungen Schaden anrichten, vor allem in explosionsgefährdeten Räumen. In anderen Fällen ist die Neigung der verschiedenen Ladungen zueinander erwünscht: Mit Hilfe dieses Naturgesetzes werden die Rußteile des Rauchs in Rauchgasreinigern der Fabrikschornsteine elektrisch niedergeschlagen. Diese Wirkung gewinnt immer größere Bedeutung, denn die Luftverschmutzung nimmt zum Teil bedrohliche Ausmaße an.

Zwei verschiedene *elektrische Ladungen* mit ihren Trägern (Metallplatten, Metallkugeln und dergleichen) und dem dazwischenliegenden *Spannungsfeld* – das sind außerordentlich wichtige Begriffe geworden. Stets gibt es zwei *Pole*, und immer sind sie entgegengesetzter Natur; diese Erscheinung nennen wir die *Polarität*.



Zwischen zwei Platten mit verschiedenen elektrischen Ladungen herrscht eine Spannung



Gestörtes Gleichgewicht

Die *Reibungselektrizität* tritt nicht während des Reibens auf, sondern erst nachher, wenn die beiden beteiligten Stoffe voneinander getrennt sind und nun (entgegengesetzt geladene) Ladungsträger bilden. Der englische Arzt und Physiker William Gilbert (1540 bis 1603) hat nachgewiesen, daß man



Die Influenz
schafft im
betroffenen Körper
einen Spannungszustand

auch mit anderen Harzen, mit Glas und weiteren isolierenden Stoffen die gleichen Erscheinungen wird wie mit Bernstein hervorrufen kann. Später lernte man Nichtleiter von Leitern unterscheiden und fand, daß auch Feuchtigkeit in Nichtleitern die Elektrizität leitet; man entdeckte, daß sich gleichartig geladene Körper abstoßen, während sich Körper entgegengesetzter Ladung anziehen. 1733 stellte der französische Physiker du Fay fest, daß man die beiden Elektrizitätsarten beliebig durch Reiben von Harz und von Glas erzeugen kann. Man sprach daraufhin (da die Ausdrücke „positive“ und „negative“ Ladung noch unbekannt waren) von „Glaselektrizität“ (+) und „Harzelektrizität“ (-).

Bald danach, um die Mitte des 18. Jahrhunderts, wurde die *Influenz* entdeckt – eine Erscheinung, die wir als letzte vor den Versuchen klären müssen, um nachher alles richtig zu verstehen. Das Wort kommt vom lateinischen *influere* = einfließen; wir können vom „Einfluß“ sprechen. Ein Metallstück wird im elektrischen Feld (zwischen den beiden Polen) so beeinflusst, daß es sich in der Nähe der positiven Ladung negativ und in der Nähe des negativ geladenen Pols positiv auflädt.

Für uns ist das heute leicht zu erklären; im 18. Jahrhundert war das noch nicht möglich, denn man glaubte ja noch an die Unteilbarkeit des Atoms – gemäß der wörtlichen Übersetzung des griechischen *a-tomos* = unteilbar! Wir wissen, daß das Atom aus einem positiv geladenen Kern und aus negativ geladenen Elektronen besteht, die um den Kern kreisen. Alle Elektronen zusammen haben ebensoviel negative Ladung wie der Kern positive; es herrscht elektrisches Gleichgewicht, und das Atom zeigt keinerlei Ladung nach außen an. Nun gibt es einzelne Elektronen, die es mit der Treue zum Kern nicht sehr genau nehmen. Reibt man einen Glasstab mit einem Reibzeug, so springen sie ganz munter aus dem Glasstab in das Reibzeug über; wir unterhielten uns ja schon darüber. Was ist die Folge? Im Glasstab sind jetzt zuwenig Elektronen (Elektronenmangel); die positive Ladung der Atomkerne überwiegt; der Glasstab wird positiv geladen. Die Kräfte im Atom sind elektrischer Natur! Das Reibzeug hat entsprechend zu viele Elektronen und wirkt negativ geladen. Beim Hartgummistab ist es umgekehrt; hier springen die Elektronen vom Reibzeug auf den Stab. Entlädt man die Pole (Stab und Reibzeug) dadurch, daß man sie leitend miteinander verbindet oder wartet, bis feuchte Luft das tut, dann nehmen dieselben oder gleiche Elektronen aus dem unerschöpflichen Vorrat der Erde die freien Plätze in den Atomen wieder ein, und das elektrische Gleichgewicht ist wieder hergestellt. Die eindrucksvollste Entladung ist die Form eines Funkens. Die Spannung muß hier schon recht groß sein, damit die Ladung die isolierende Luftschicht überwinden, gewissermaßen durchbohren kann. Es gibt sehr viele einfache Versuche, bei denen die Elektrizität erzeugt (oder besser frei gemacht), nachgewiesen und zu erstaunlichen Wirkungen verwendet wird. Wir wollen zunächst einmal einige Möglichkeiten zum Erzeugen der Ladung erproben. Später werden wir dann untersuchen, wie man elektrische Ladungen sammelt, und schließlich die Ladungs-Anzeiger, die Elektroskope, bauen. Danach können wir uns alles nach Wunsch aussuchen und zu einzelnen Versuchen zusammenfügen.



So kann man sich
ein Atom aufgebaut
vorstellen
(ein Beispiel
von vielen)

Die einfachsten Methoden

Zunächst wollen wir Methoden kennenlernen, nach denen wir elektrische Ladungen ohne großen apparativen Aufwand erzeugen.

Der elektrische Fußabtreter

Treten wir auf eine gutisolierte Platte aus Glas oder Plastwerkstoff, so wird unser Körper durch die Reibung zwischen Platte und Sohlen bereits aufgeladen. Mit einem empfindlichen Elektroskop ist die Ladung nachweisbar (wir halten einen Finger an das Gerät).

Das elektrische Papier

Wir wärmen ein Stück Schreibpapier oder eine Postkarte etwas an, damit sie ganz trocken und zum guten Isolator wird, und fahren mit der trockenen Hand oder einer Kleiderbürste darüber; das Papier wird elektrisch und zieht anderes Papier – auch Schnitzelchen – an. Das geriebene Papier haftet auch an der Hand. Liegt ein nichtgeriebenes Blatt durch Anziehung fest am geladenen Blatt, so ist dieses ausreichend „beschäftigt“ und zieht keine Papierschnitzel mehr an. Das tut es erst wieder, wenn man das ungeriebene Blatt abgezogen hat.

Besonders stark laden sich Filme und Folien aus Plastwerkstoff auf, beispielsweise Schreibmaschinen-Walzenschoner und Schreibunterlagen. Das geschieht schon durch das Schreiben und Weiterbewegen des Schoners auf der (ebenfalls isolierenden) Walze. Man hat manchmal Mühe, das dünne Durchschlagpapier oder Kohlepapier von dem geladenen Schonerblatt abziehen. Warum? – Sobald wir dem geladenen Bogen einen neutralen (ungeladenen) nähern, entsteht in diesem durch Influenz eine entgegengesetzte Ladung; beide Ladungen ziehen einander an.

Die Zauberschachtel

Es gibt flache, runde Schachteln aus durchsichtigem Plastwerkstoff für Käse, Pralinen oder Bonbons. Wir säubern eine leere derartige Schachtel, legen einige Papierschnitzel (Konfetti aus dem Bürolocher!) hinein und schließen den Deckel. Reiben mit dem trockenen Finger auf dem Deckel (oder Boden) der waagrecht liegenden Schachtel läßt die Fläche auf und läßt die Papierstückchen tanzen – stets nach den Gesetzen der Influenz, der Anziehung und Abstoßung der Ladungen.

Der „klassische“ Stab

Die bekannteste Art, eine elektrische Ladung zu erzeugen, ist das Reiben eines Stabes aus Glas oder Plastwerkstoff oder Siegelack mit Wolle, Seide,



Fell und anderem. Eine mit Wolle geriebene Glasstange hat meist eine positive Ladung. Es gibt „Spannungsreihen“, die angeben, „was womit gerieben welche Ladung erhält“ – aber wir können damit nicht viel anfangen; erstens sind die Reihen umstritten, und zweiten kommt es oft auf die genaue Zusammensetzung der einzelnen Stoffe an.

Der elektrische Kamm

Jeden Tag erzeugen wir ohne Absicht elektrische Ladungen, wenn wir mit dem Kamm durchs Haar fahren und wenn wir Pullover, Wäsche und Strümpfe aus Kunstfasern an- oder ausziehen. Die Hauskatze liebt es nicht, wenn wir ihr Fell „gegen den Strich“ streichen – sie spürt die entstandene Ladung. Katzenfell eignet sich gut als Reibzeug; aber es sollte nicht mehr an der lebenden Katze sitzen!

Der vergessene Elektrophor

Das ist ein Wort aus dem Griechischen und bedeutet Elektrizitätsträger. Der *Elektrophor* ist ganz zu Unrecht durch die vielen Arten von Reibungs- und Influenz-Elektrisiermaschinen in den Hintergrund gedrängt und fast vergessen worden. Dabei kann man mit ihm am einfachsten größere Ladungsmengen erzeugen, die für alle Versuche ausreichen, und er ist leicht selbst zu bauen. Er erinnert an einen Kondensator: zwei Metallschichten, die durch einen Isolator voneinander getrennt sind.

Der Bau des Elektrophors

Der Elektrophor besteht aus einem sehr flachen, runden Blechbehälter (A), einer darin liegenden Schicht („Kuchen“) aus Isolierstoff und einem etwas kleineren Metalldeckel (B) mit isolierendem Griff (G). Der Blechbehälter, der an ein Kuchenblech erinnert, hat 20 bis 30 cm Durchmesser; der Rand ist 1 bis 1,5 cm hoch. Der Deckel aus Zink-, Messing- oder Kupferblech ist im Durchmesser etwa 3 cm kleiner als der Kuchen; in seiner Mitte ist eine Metalltülle (T) angelötet. In der Tülle wird ein massiver Glasstab (G) als Griff mit Plastleim, Kitt oder Siegellack befestigt. Das Blechgefäß kann aus einem kreisförmigen Stück Blech mit ringsherum angelötetem Blechstreifen als Rand bestehen.

Eines ist bei allen leitenden Teilen streng zu beachten: Nirgendwo darf eine scharfe Kante, Ecke oder gar Spitze sein. Die Elektronen verteilen sich auf Leitern sofort; ist eine elektrische Ladung vorhanden, so versuchen sie bei Überschuß (negativer Ladung) vom Leiter zu entweichen oder bei Mangel (positive Ladung) von außen hineinzuschlüpfen. Das können sie nicht oder nur sehr langsam bei abgerundeten Oberflächen; daher finden wir bei Geräten zur ruhenden Elektrizität meist Kugeln als Abschluß. Wir müssen deshalb alles sorgfältig rundfeilen, am besten den Rand bördeln (umbiegen).



Der Elektrophor
in der Aufsicht
und im Schnitt

Als Kuchen nehmen wir eine sehr isolierende Platte aus Plast, etwa Plexiglas oder Hartgummi. Man kann sie auch – einfach gleich im vorsichtig erwärmten Blechgefäß – selber gießen: reines Koloophonium oder eine Mischung aus fünf Teilen (etwa 250 g) ungebleichtem Schellack, einem Teil Terpentin und einem Teil Wachs. Bei der Mischung schmilzt man zuerst bei mäßiger Hitze Terpentin und Wachs zusammen; dann gibt man bei stärkerer Hitze unter ständigem Umrühren den Schellack in kleinen Stücken hinzu – das nächste Stückchen immer erst, nachdem das vorige geschmolzen ist. Man läßt dann 5 bis 6 Stunden erstarren und abkühlen. Blasen, die beim Schmelzen entstehen, müssen sofort aufgestochen werden; die Oberfläche muß völlig glatt sein.

Der Elektrophor wird geladen

Um den Elektrophor zu laden, reibt man die ganze Fläche des Kuchens mit einem Fell, Woll- oder Seidentuch (je nach Art des Kuchens; ausprobieren!) sehr stark ab, legt den Deckel genau auf die Mitte, so daß er nicht auf dem Gefäßrand liegt, und berührt ihn an der Oberfläche kurz mit einem Finger. Nehmen wir den Deckel jetzt ab, so ist er geladen; wir können beispielsweise aus ihm Funken ziehen. Die Erklärung ist leicht. Durch das Reiben ist im Kuchen eine negative Ladung entstanden. Durch Influenz wird das Blechgefäß positiv geladen. Im aufliegenden Deckel geht das gleiche vor sich: Die Deckelelektronen laufen von den gleichgeladenen Elektronen an der Kuchenoberfläche möglichst weit fort – zunächst bis an die obere Oberfläche des Deckels, denn vom runden Metall können sie nicht abspringen. Dazu müßten es viel mehr sein, das heißt, die Spannung müßte größer sein. Die Unterseite des Deckels ist jetzt positiv geladen; diese positive Ladung fühlt sich so nahe an der negativen des Kuchens sehr wohl. Sie bleibt auch sitzen, wenn wir den Deckel berühren; aber die Elektronen oben am Deckel benutzen schleunigst die Gelegenheit, um über den Finger zur Erde zu verschwinden! Der Deckel ist jetzt geladen und wird vom entgegengesetzt geladenen Kuchen angezogen; beide Ladungen binden einander, so daß nach außen keine elektrische Wirkung erkennbar ist. Heben wir den Deckel hoch, so merken wir zunächst, daß dazu eine mechanische Kraft nötig ist – über das Gewicht des Deckels hinaus; die elektrische Anziehungskraft muß zusätzlich überwunden werden. Diese Kraft können wir mit unserem Zugkraftmesser messen (Gewicht des Deckels abziehen!). Der abgehobene Deckel ist nun bereit, seine positive Ladung abzugeben, das heißt, Elektronen aufzunehmen; wir können mit ihm experimentieren. Kommen wir beispielsweise mit einem Finger in seine Nähe, so erfolgt die Entladung durch einen Funken (nicht gefährlich).

Dieses Verfahren können wir oft wiederholen; wir setzen den Deckel wieder auf den Kuchen und heben erneut ab. Mit der Zeit wird die Ladung schwächer; erstens leitet die Luft durch ihre Feuchtigkeit etwas, zweitens gleicht sich mit der Zeit die Ladung im Kuchen aus, und schließlich ist auch der Elektrophor kein Perpetuum mobile: Wir können nicht mehr (elektrische)

Arbeit herausholen, als wir (mechanische durch Reiben und Deckelabheben) hineingesteckt haben. Wir sehen, wie folgerichtig die Naturgesetze wirken!

Ein Behelf

Etwas Ähnliches wie diesen Elektrophor können wir folgendermaßen aufbauen: Wir legen ein Metalltablett oder einen großen Topfdeckel (diesen mit dem Griff nach unten) auf drei oder vier Gläser, also gegen Erde isoliert. Ein doppeltes Stück Zeitungspapier, für Tablett oder Deckel passend zugeschnitten, legen wir auf den warmen Kachelofen und bürsten es kräftig mit einer harten Kleiderbürste. Dann legen wir das Papier mit Hilfe einer ganz trockenen Wäscheklammer auf das Tablett oder den Deckel. Wir können aus dem Metall jetzt recht kräftige Funken ziehen.

Die einfachste Lösung

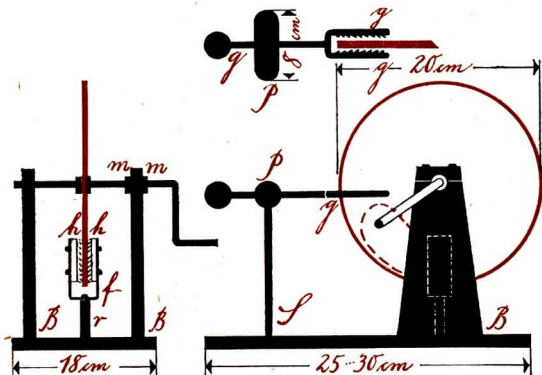
Auch eine *Filmfolie* (beispielsweise ein alter Röntgenfilm, von dem die Emulsion mit warmem Wasser abgewaschen und dann sorgfältig getrocknet worden ist) eignet sich zum Elektrophorkuchen. Einfacher geht es wirklich nicht: ein Stück Blech, darauf die Folie als Kuchen und zuoberst ein kleineres Blechstück, dieses hat in der Mitte ein Stückchen Leukoplast, und darauf ist eine angewärmte Kerze als Griff geklebt. Solche Filmfolien laden sich leicht und stark auf.

Die Reibungs-Elektrisiermaschine

Sie liefert eine gleichmäßige und starke Ladung für anspruchsvolle Experimentatoren. Allerdings erfordert ihr Bau einige Werkzeuge, Material und Arbeit. Schwierigkeiten sind nicht zu erwarten, wenn man sehr sauber und mit Überlegung arbeitet; Murks wird durch Ladungsverlust quittiert.

Der Aufbau der Reibungs-Elektrisiermaschine

Die Abbildung auf der folgenden Seite zeigt eine bewährte Bauart; die Maße sind in cm angegeben. Das Grundbrett trägt die beiden Lagerböcke (B) für die Achse mit Glas- oder Plastscheibe, eine Reibvorrichtung (r-f-h) und einen Glasstab (S) mit Ladungssammler (P), auch „Konduktor“ (lateinisch = Zusammenleiter) genannt, der eine Gabel zum Abnehmen der Ladung von der Scheibe und einen Stab mit Kugel hat. Die Lagerböcke sind 18 cm hoch; einer hat ein aufschraubbares Lager-Oberteil, damit die Achse noch eingefügt werden kann, wenn die Böcke bereits auf dem Grundbrett befestigt sind. Die Achse wird aus 5 bis 10 mm starkem Rundeisen mit Kurbel gegeben; sie muß zwischen den Lagern ganz gerade sein, damit die Scheibe

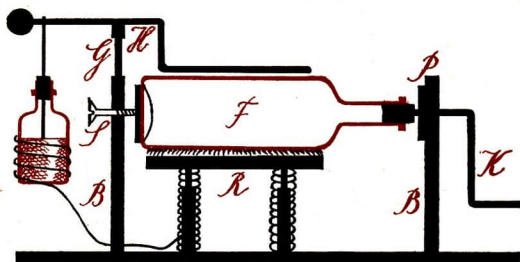


nicht schlägt. Zwei Holz- oder Metallringe (m), mit der Achse verstiftet, verhüten, daß sich die Achse seitlich verschiebt.

Die Scheibe (20 cm Durchmesser) ist der physikalisch schwierigste Teil. Man kann sie sich leicht vom Glaser schneiden und bohren lassen – sollte aber vorher durch einen kleinen Reibungsversuch prüfen, ob die betreffende Glassorte geeignet ist. Im durchfallenden Licht erscheinen ungefärbte Gläser meist farblos; in der Schnittfläche zeigen sie oft eine Färbung: grün, blau oder rot. Die in der Schnitt- oder Bruchfläche bläulich oder rötlich scheinenden Gläser sind für unsere elektrischen Geräte unbrauchbar; die Bestandteile des Glases, die diese Färbungen verursachen, verringern die Isolierfähigkeit (den elektrischen Widerstand) des Glases. Grünliches Glas, also auch gewöhnliches Fensterglas, ist oft brauchbar; am besten eignet sich farblos scheinendes Glas. Sehr gute Erfahrungen kann man mit uralten, harten Schallplatten (aus Schellack) machen – aber wer hat die noch?

Dann haben wir den vielseitig verwendbaren Plastwerkstoff. Scheiben aus Hartgummi, Plexiglas und anderen isolierenden Platten sind leicht zu bearbeiten und geben gute Ladungen. Sie sind auch leichter als Glas mit Hilfe zweier Holzscheiben mit der Achse zu verkleben oder zu verkitten; die Achse muß ja die Scheibe auf alle Fälle mitnehmen – auch gegen den Widerstand der Reibflächen.

Die Reibvorrichtung besteht aus dem Fuß (r) und zwei Holzbrettchen (h), die innen mit Katzenfell gefüttert sind und durch eine gabelförmige Feder (f) ziemlich stark gegen die Scheibe gedrückt werden. Die Feder wird aus hartgehämmertem Messingblech hergestellt. Der Fuß besteht aus Plastwerkstoff oder Glasrohr. Im letztgenannten Fall wird die Feder durch einen



angeschraubten Holzpflock mit dem Glasrohr verbunden; das Holz wird eingeleimt oder eingekittet.

Drehen wir jetzt die Scheibe, so wird sie durch Reibung aufgeladen; allerdings nützt uns die Ladung dort noch nichts. Wir müssen sie durch raue Metalloberflächen, besser noch durch kleine Metallspitzen, absaugen. Das geschieht durch die Gabel gg am Sammler P. Sie besteht aus starkem Messingdraht und ist stumpf an den Draht g gelötet, der durch den Sammler hindurchgeht und am anderen Ende eine Metallkugel trägt. Alle diese Teile tragen ruhende Ladung mit Fluchtneigung; sie müssen daher sehr sorgfältig abgerundet sein.

Eine Ausnahme machen die Gabelflächen, die der Scheibe mit wenigen Millimetern Abstand zugewandt sind. Sie sollen die Ladung übernehmen, müssen ihr also einen Weg bieten. Am besten bringt man daher auf den Innenseiten der Gabel kleine Stecknadelspitzen an; meist genügt es allerdings, die Innenflächen mit einer Raspel ganz rau zu machen.

Der Sammler (Konduktor) auf seinem Glasfuß soll mit seiner großen, wohlgerundeten Oberfläche eine möglichst große Ladung auf Vorrat aufnehmen können. Da diese Ladung doch nur an der Oberfläche sitzt, können wir den Sammler aus Pappe kleben oder aus Holz schnitzen und dann sehr sauber (glatt) mit Stanniol (Zinnfolie, „Silberpapier“, Aluminiumfolie) bekleben. Diese Oberfläche muß mit der Gabelstange gleitend verbunden sein.

Damit ist die Reibungs-Elektrisierungsmaschine fertig. Eine kleine Verbesserung ist noch dadurch möglich, daß man an jedes Reibeisen einen Flügel aus Seidenstoff apleimt, der sich beim Drehen seitlich an die Scheibe legt und den Verlust von Ladung auf dem Wege vom Reibzeug zur Gabel verhindert (in der Abbildung auf Seite 165 punktiert angedeutet). Während des Betriebes entsteht im Reibzeug eine elektrische Ladung, die derjenigen der Scheibe und damit des Sammlers entgegengesetzt ist. Man kann daher Sammler und Reibzeug beide Arten der Ladung entnehmen. Im allgemeinen wird man mit der Sammlerladung experimentieren; man verbindet dann die Feder des Reibzeugs durch eine kleine Kette mit der Erde (Tisch oder Fußboden).

Die Ladung aus der Flasche

Man kann statt der Glasscheibe auch einen Glaszylinder verwenden, am einfachsten eine Flasche mit gewölbtem Boden.

Der Aufbau der Flaschen-Elektrisiermaschine

In der Abbildung auf Seite 166 sind BB die Lagerböcke, F ist die Flasche, R das (mit zwei Wendelfedern angedrückte) Reibzeug, K die Kurbel, S eine Holzschraube, die an einem Holzkeil in der Bodenhöhlung der Flasche angreift, P ein Pappring, um den Abstand zwischen Lager und Flaschenkorke auszufüllen, H eine Metallhülse auf dem Glasstab G. An Stelle der Gabel im vorigen Versuch saugt eine einfache Stange die Ladung ab. Statt des Sammlers (Konduktor) ist eine Sammlerflasche gezeichnet, von der wir bald noch einiges erfahren werden.

Die Schwierigkeit bei diesem Modell liegt wieder in der Glassorte! Es empfiehlt sich, verschiedene Flaschen gründlich zu prüfen.

Eine andere Lösung

Sehr viel sicherer arbeitet die von Fr. Liebmann beschriebene Bauart. Dieser benutzt statt der Glasflasche ein Stück eines Regenfallrohres aus PVC-hart; die offenen Enden werden mit Holzschrauben verschlossen. Man muß sich ein Rohrstück heraussuchen, bei dem die Schweißnaht nicht vorsteht und beim Reiben stört.

Elektrizität aus Wassertropfen

Es gibt eine merkwürdige Erscheinung: Wenn sich Wasser an festen Körpern reibt, lädt es sich positiv auf, und der geriebene feste Körper wird dann notwendigerweise negativ geladen. Der englische Physiker Michael Faraday (1791 bis 1867) hat das schon gewußt. Man kann Wassertropfen (niemals einen zusammenhängenden Strahl) eine Paraffinrinne hinabrollen oder an der Innenwandung eines Paraffinrohres herableiten lassen und unten in einem isoliert aufgestellten Metallbehälter auffangen. Der Behälter, am besten mit einer Konduktorkugel versehen, sammelt die positive Ladung; das Paraffin wird negativ geladen.

Die Paraffinrinne stellt man dadurch her, daß man aus einer großen Paraffinkerze der Länge nach mit einem dicken heißen Metallstab die Rinne herauschmilzt. Bessere Ergebnisse hat die Anordnung, die nebenstehend abgebildet ist: Zwei Brettchen werden der Länge nach zusammenge-nagelt oder mit Plastleim geklebt. Dann wird die so entstandene Rinne durch mehrfaches Bepinseln oder Tauchen mit heißem Paraffin überzogen. Den



Behälter stellt man einfach auf die Konduktorscheibe eines guten Elektroskops, das die Ladung anzeigen soll.

Die Ladung entsteht durch Abrollen des Wassers auf dem Paraffin. Es müssen einzelne Tropfen sein; ein zusammenhängender Wasserfaden würde die Ladung wieder fortleiten und ausgleichen.

Ganz neuzeitlich: Der Bandgenerator

„Neuzeitlich“ ist ein relativer Begriff; vielleicht wird der Bandgenerator in 50 oder 100 Jahren schon eine historische, überholte Sache sein. Aber für uns ist er erst einige Jahrzehnte alt; er ist 1931 von dem holländischen Physiker van de Graaff zum erstenmal gebaut worden.

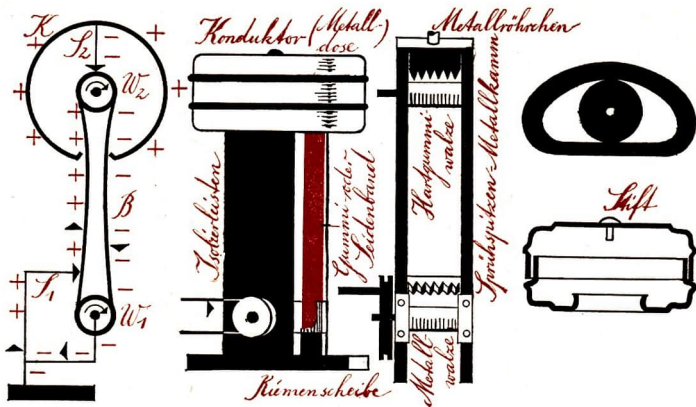
Eigentlich ist der Name „Bandgenerator“ unklar, irreführend und daher schlecht. Es ist eher eine Band-Elektroversmaschine, ein Gerät zum Erzeugen hoher Gleichspannungen mit Hilfe eines endlosen Bandes aus hochisolierendem Stoff, beispielsweise Seide, Plastgewebe oder Gummi, das über zwei Walzen läuft. Die Anordnung erinnert an einen Treibriemen über zwei Riemenscheiben. Durch Andrücken des Bandes an eine Walze aus Isolierstoff entsteht (hier ohne die unnötige Reibung) eine *Berührungsspannung*; wenn sich das Band von der Walze abhebt, wird die Spannung mit dem Feld stark vergrößert. Die Abbildung auf der nächsten Seite zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Bandgenerators und die Wirkungsweise.

Das Band (B) läuft über die obere Walze W_2 aus Isolierstoff (Hartgummi, Plastikwerkstoff) und die untere Walze W_1 aus Metall. Die obere Walze ist ganz überdeckt von einer hohlen Kugel oder einem anderen abgerundeten Körper aus Metall, dem Konduktor K (wir ahnen schon, wozu der da ist!). Vom Konduktor ragt ein Metallkamm (S_2) mit vielen scharfen Spitzen ganz dicht (1 bis 2 mm) an das Band heran, und zwar quer dazu, also über die ganze Bandbreite hinweg.

So spitz wie der Kamm sein soll, so rund und ohne spitze Stellen muß der Konduktor sein, denn dieser soll die Ladung festhalten, jener soll sie durchlassen. An der Unterseite hat die Hohlkugel K ein Loch, um das Band (und die Seitenteile) hindurchzulassen. Die Ränder dieser Öffnung müssen nach innen rund eingebogen werden; von scharfen Kanten würde die Ladung in den Raum abströmen.

Die untere Walze W_1 ist aus Metall. Dicht darüber ist ein zweiter Metallkamm S_1 mit der Erde, das heißt mit dem Grundbrett, verbunden. W_1 ist zugleich Antriebswalze, wird daher mit Kurbel für Handantrieb und Antriebscheibe für Motorantrieb versehen. Wird W_1 gedreht, so bewegt sich das straffgespannte Band über die Walzen; elektrisch tut sich nun folgendes:

Durch die dauernde Berührung und Trennung von Band und isolierender Walze W_2 sammeln sich auf dem Band negative und auf der Walze positive Ladungen an. Die negative Ladung nimmt das Band nach unten bis zur Metallwalze W_1 mit, die mit der Erde verbunden ist; die Elektronen neh-



men die Gelegenheit wahr und entweichen. Auf ihrem Wege nach unten haben sie (durch Influenz, Anziehung) den aufwärts gehenden Bandteil positiv geladen. Durch den Sprühkamm S_1 (den unteren Metallkamm) gelangt weitere positive Ladung auf den linken Bandteil (wo sie durch die Influenz sehr gefragt ist).

Jetzt ist nicht nur W_2 positiv geladen, sondern auch das Band liefert ständig die gleiche Ladung nach; die Folge: Elektronen – negative Ladung – werden da oben dringend gesucht! Sie spritzen denn auch eifrig aus dem Sprühkamm S_2 auf das Band; das befördert sie in bekannter Weise ins Freie. Auf dem Konduktor aber fehlen Elektronen, bleibt die positive Ladung. Sie wird bei weiterem Drehen immer stärker und erreicht bei trockener Luft leicht 100000 V und mehr, wenn das Modell sauber gebaut und der Konduktor nicht zu klein ist. Die Spannung ist, wie schon erwähnt, dem menschlichen Körper nicht gefährlich, weil die dazugehörenden Stromstärken winzig sind.

Das ist ein einfaches, aber wirksames Prinzip; es wird in großen Bandgeneratoren zum Erzeugen von sehr hohen Gleichspannungen für Teilchenbeschleuniger in der Kernphysik ausgenutzt. Um die Wirkung zu verstärken, wird in der Praxis durch einen Sprühkamm eine Gleichspannung in der Größenordnung von 10 kV (10000 V) aufgesprüht.

Wir bauen das Modell

Ein brauchbares Modell ist ohne große Schwierigkeiten zu bauen. Der Hauptteil auf dem Grundbrett besteht aus zwei Leisten aus Plastwerkstoff, einer Metallwalze (unten) und einer Walze aus Plastwerkstoff (oben) sowie

zwei Metallkämme. Der untere Metallkamm ist über die Achse (Rund-eisen) mit der Metallwalze verbunden; der obere Metallkamm verbindet mit seiner waagerechten Rückseite die beiden Leisten und trägt ein Stück Metallrohr zum Aufsetzen des Konduktors.

Die Leisten (Seitenteile) sind 25 bis 30 cm lang und 4 bis 5 cm breit. Der Durchmesser der Walzen beträgt etwa 2 cm, die Länge richtet sich – ebenso wie der Abstand der Leisten – nach der Breite des Bandes, die nicht weniger als 4 cm betragen soll und von der Größe des Konduktors abhängt. Die Achse der oberen Plastwalze, ein runder Nagel, wird herausziehbar angeordnet, damit man die Walze gelegentlich säubern kann. Sauberkeit ist (nach der Abrundung der ladunghaltenden Teile) oberstes Gebot; Staub leitet die Ladungen ab!

Die untere Metallwalze wird fest mit der Kurbelwelle verbunden, damit der Antrieb möglich ist. Zu empfehlen ist außerdem ein Antriebsrad auf der Achse für Anschluß an einen Elektromotor. Sehr günstig ist es, das U-förmig gebogene untere Blech (mit dem Sprühkamm in der Mitte) so anzuordnen, daß man es nach einiger Zeit ein wenig nach unten verschieben kann; manche Bänder geben mit der Zeit etwas nach und können dann wieder straff gespannt werden. Durch die Kurbelwelle aus Rundeisen wird die Metallwalze mit dem Blech und dadurch mit dem Sprühkamm verbunden.

Das Band kann aus Seide, Plastgewebe, Gummi und anderen hochisolierenden Stoffen hergestellt werden. Das Gummiband kann man aus einem alten, sehr gut gesäuberten Fahrradschlauch schneiden. Die Enden klebt man zusammen; vulkanisieren ist noch besser. Die Sprühkämme sollen möglichst viele scharfe Spitzen enthalten. Wer geschickt genug ist, kann Spitzen von Stecknadeln oder schräg abgeschnittene Stücke von Blumen-draht anbringen. Die Spitzen sollen, wie erwähnt, 1 bis 1,5 mm an das Band heranreichen.

Für den Konduktor werden wir wohl kaum eine große Hohlkugel finden. Aber eine Aluminiumdose mit Deckel, die nur glatte, gerade und runde Flächen ohne scharfe Kanten hat, läßt sich schon eher auftreiben (Butter-brot-dose beispielsweise). Sie darf auch länglich sein! In Boden oder Deckel wird ein rundes Loch eingeschnitten, so groß, daß man den Konduktor, zu dem die Dose nun geworden ist, über das obere Ende unseres ganzen Bau-werks stülpen kann; oberer Sprühkamm und Plastwalze verschwinden darin. Der Abstand zwischen dem Rand der Öffnung und dem Gestell soll etwa 0,5 cm groß sein. Der Rand des Loches muß nach innen gebogen werden, damit keine Kante nach außen liegt. Innen im Konduktor schadet die Kante nicht mehr.

Es gibt auch längliche Konduktoren, die aus engmaschiger Drahtgaze hergestellt sind; einige Blechbänder sorgen dafür, daß die Form erhalten bleibt.

Unser Konduktor erhält zuletzt den eingienieteten Metallstift, der in das Röhrchen oberhalb des oberen Sprühkammes genau hineinpaßt. Damit wird der Konduktor mechanisch fest an seinem Platz gehalten und gleichzeitig elektrisch mit dem Sprühkamm verbunden.

Wenn wir mit Handantrieb arbeiten, ist die Metallwalze über die Kurbelachse ausreichend mit der Erde verbunden. Bei Motorantrieb verbinden wir die Achse mit der Erde durch ein Metalkettchen, das auf dem Grundbrett (Holz) liegt.

Das ist *ein* Vorschlag, ein Bandgenerator-Modell zu bauen. Der Möglichkeiten gibt es viele, wenn nur die Gesetze der ruhenden Elektrizität dabei beachtet werden. Der schöpferischen Phantasie des Lesers ist auch hier keine Grenze gesetzt – eigene Entwicklungen machen die meiste Freude!

Die elektrische Ladung wird gesammelt und angezeigt

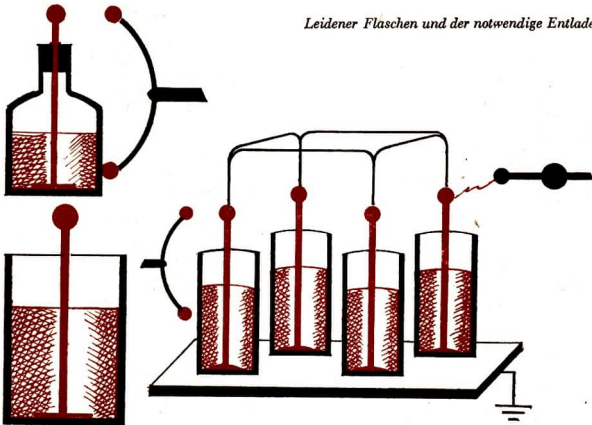
Die Konduktoren an unseren verschiedenen Elektrysiermaschinen und am Bandgenerator sammeln die Ladung schon nach Kräften oder besser nach Größe ihrer Oberfläche; aber es gibt noch eine bessere Lösung.

Die Leidener Flasche

Der Physiker benutzt häufig die Sammelflasche, auch Kleistsche Flasche genannt, weil E. von Kleist sie 1745 als erster baute. Man nennt sie heute meist *Leidener Flasche*, weil Cunaeus in Leiden (Holland) sie 1746 unabhängig von Kleist erfunden hat. Sie ist nichts anderes als ein runder Kondensator mit Glas als Dielektrikum (Zwischenisolation), mit anderen Worten: eine Flasche oder ein Standglas, innen und außen bis zu einer bestimmten Höhe mit Stanniol beklebt. Der Stanniolbelag bedeckt innen und außen auch den Boden des Gefäßes; er darf an der Wandung nicht zu hoch gezogen werden, damit kein Funken überschlagen kann. In der Flasche steht auf zwei kreuzförmig angebrachten Metallstreifen eine Stange, die am oberen Ende eine Kugel trägt.

Der äußere Belag steht auf dem Tisch, ist also mit der Erde verbunden. Eine solche Leidener Flasche kann eine ziemlich große Ladung aufnehmen und bei trockener Luft auch lange bewahren. Laden wir beispielsweise die Flasche über die Stange negativ auf, so entsteht durch Influenz am äußeren Belag eine positive Ladung; die verdrängten Elektronen entweichen in die Erde, wenn die Flasche nicht isoliert steht.

Die Ladung der Flasche kann bei entsprechender Aufnahmefähigkeit (Kapazität, von lateinisch *cápere* = aufnehmen) so groß werden, daß eine Entladung über den menschlichen Körper zu Schäden (Lähmungen) führt – vor allem wenn mehrere Flaschen zu einer Batterie zusammengeschaltet sind. Deshalb darf man eine Leidener Flasche (und jeden anderen größeren



Kondensator!) nur über einen Entlader entladen; er ist in der obenstehenden Abbildung ebenfalls zu sehen. Ein Entlader ist ein rundgebogenes Drahtstück mit Kugeln an beiden Enden und einem isolierenden Griff aus Glas oder Plast in der Mitte. Die Kugeln sollen die entstehenden Funken möglichst kurz halten.

Wir dürfen niemals eine geladene Batterie ohne Aufsicht lassen, auch nicht über Nacht stehenlassen. Gummihandschuhe als Isolierung schützen gegen diese hohen statischen Spannungen nicht; sie werden schnell durchschlagen. Gehen wir richtig mit der Batterie oder Flasche um, dann können wir erstaunliche Versuche machen, beispielsweise Funkenschlag durch Isolierstoffe, Nachahmung eines Blitzschlages.



Der Bau der Leidener Flasche

Wir bauen eine Leidener Flasche am einfachsten aus einem Einmachglas. Es wird sehr gründlich gereinigt; dann kleben wir innen und außen Stanniol mit Eiweiß oder Plastkleber auf. Das ist nicht so leicht getan wie gelesen; am besten klebt man 5 bis 10 breite Streifen. Bei kleinen Gläsern bekleben wir drei Viertel, bei großen Gläsern zwei Drittel der Höhe. Auch der Boden wird innen und außen beklebt. Die Stanniolflächen sollen so glatt wie möglich sein. Den frei gebliebenen oberen Glasteil kann man mit Schellack dünn bestreichen.

Nun müssen wir noch die Metallstange mit der Kugel anbringen. Da gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder stellen wir sie auf vier Füße, oder wir hängen

sie an einem Deckel aus Plastwerkstoff auf. Im ersten Fall schrauben, nieten oder löten wir kreuzweise zwei Bänder aus Metall am unteren Stangenende an. Im zweiten Fall binden wir am unteren Ende der Stange ein Büschel aus mehreren Stanniolstreifen an; die freien Enden dieser Streifen liegen dann auf dem Bodenbelag.

Das Loch im Deckel macht man so klein, daß die Stange gut fest sitzt. Der Deckel erhält drei oder vier angeklebte Plast- oder Holzstückchen, die ihn vor seitlichem Verrutschen schützen. An Stelle der Kugel — das gilt auch für andere Geräte — kann eine Scheibe aus dickem Blech aufgelötet werden; ihr Rand muß jedoch tadellos rundgefeilt sein.

Vielleicht fragt der eine oder andere Leser: Kann man nicht den inneren Belag durch Leitungswasser (nicht destilliertes!) ersetzen? Das leitet doch auch! Ja, man kann es grundsätzlich wohl; aber die durch Verdunsten aufsteigende Feuchtigkeit verringert die Isolation von Luft und Flasche und stört unsere Versuche. An Stelle einer großen Flasche lassen sich aus großen Reagenzgläsern viele kleine herstellen; man stellt sie zu einer Batterie zusammen, indem man alle äußeren Beläge miteinander verbindet und ebenso alle inneren.

Bei den Versuchen mit der Reibungselektrizität lernt man am besten, was ein wirklicher Isolator — Nichtleiter — ist! Holz gehört im allgemeinen nicht dazu und feuchte Luft schon gar nicht. Am besten gelingen diese Versuche in einem zentralgeheizten Raum; die sonst unangenehme Trockenheit der Luft gibt eine gute Isolation.

Das Elektroskop

Wir können nun die elektrische Ladung erzeugen und sammeln; aber wir müssen sie auch schnell und leicht nachweisen können. Die Überschrift hat schon verraten, daß wir dazu ein *Elektroskop* (Elektro-skop) brauchen. Die Endsilbe „skop“ kommt vom griechischen *skopéin* = sehen. Freilich sehen wir dabei nicht die Elektrizität selbst; das wird dem Menschen wegen der Winzigkeit der Ladungsteilchen niemals möglich sein. Was wir sehen, ist nur die Wirkung der Ladung: Zwei Körper werden durch die Ladung angezogen oder abgestoßen. Außerdem gibt es noch *Elektrometer*. Die wirken auf die gleiche Weise, sind aber in Volt geeicht wie die bekannten Spannungsmesser und gestatten quantitative Aussagen.

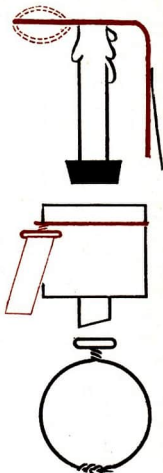
Der Grundgedanke ist denkbar einfach: An einem isoliert angeordneten Stab oder Streifen aus Metall werden zwei ganz leichte, leitende Körper beweglich angebracht. Wird dem Metall eine elektrische Ladung zugeführt, so laden sich auch die beweglichen Körper in gleicher Weise auf und stoßen einander ab. Es genügt sogar, nur einen einzigen beweglichen Körper an dem Metallstab anzubringen; er wird ebenfalls abgestoßen.

Die beweglichen Körper sind 5 bis 8 cm lange und etwa 4 mm breite Streifen aus ganz dünnem Stanniol, neuchtem Blattgold oder entsprechender Aluminiumfolie, ferner Seidenpapierstreifen oder Holundermarkkugeln, an

(leitendem) Leinenfaden aufgehängt. Auch weiche Lamettafäden sind zu gebrauchen. Zur Isolierung dient eine Flasche aus gutisolierendem Glas, eine Kerze, ein Glasstab, Plastwerkstoffe. Es gibt sehr viele Möglichkeiten, ein Elektroskop zu bauen; je einfacher die Bauart ist, desto unempfindlicher ist sie im allgemeinen. Aber auch das einfachste Elektroskop ist für uns brauchbar; es zeigt die Wirkungsweise sogar besonders gut. Fangen wir damit an!

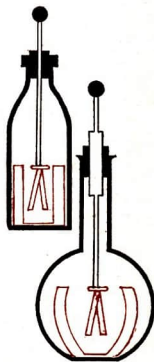
Das einfachste Elektroskop

Drahtgestell, Kerze, Stanniolstreifen. Wir biegen aus Kupferdraht mit mindestens 2 mm Durchmesser einen Ring von 8 bis 10 cm Durchmesser und führen das eine Drahtende radial einige cm weiter; dann biegen wir es senkrecht zur Ringebene um. Das letzte Stück ist etwa 10 cm lang. Einer neuen Haushaltskerze wird die Spitze abgeschnitten; das mittlere Drahtstück wird angewärmt und so tief auf die Schnittfläche (nicht auf den Docht) gelegt, daß es bündig einsinkt. Der Ring liegt nun waagerecht. Wir haben ihn gewählt, weil wir kleine Gefäße draufstellen können. Zur einfachen Anzeige der Ladung genügt es beispielsweise, den Draht neben der Kerze in einer kleinen Kugel enden zu lassen. Am senkrechten Draht kleben wir mit sehr wenig Plastkleber einen Streifen Metallfolie an: 4 mm breit, 6 bis 10 cm lang. Das Elektroskop ist fertig! Eine kurze Prüfung mit einem geriebenen Glas- oder Plaststab zeigt, daß dieses höchst einfache Gerät gut anspricht. Der Nachteil ist seine Empfindlichkeit gegen Luftbewegung; wer gerade erkältet ist und husten und niesen muß, wird eine andere Bauart wählen!



Ein Elektroskop aus Kerze und Blechdose

Diese Bauart ist auch noch „grippeempfindlich“, das heißt offen. Wir nehmen wieder eine der gutisolierenden Haushaltskerzen, lassen den Spitzenkegel abbrennen, bis der ganze Querschnitt der Kerze schön geschmolzen ist, und drücken dann eine leere, oben offene Konservendose darauf. Die Konservendose muß sehr sauber, ohne scharfen Rand und ohne Spitzen aufgeschnitten sein. Am oberen Rand erhält die Dose einen Drahttring, der an einer Stelle zu einem kleinen, geraden Träger für den Folienstreifen ausgebogen ist. Wir hängen den Streifen hinein – und auch dieses Elektroskop ist fertig.



Das Elektroskop im Kochkolben

Wir benutzen etwa 15 cm hohe, weithalsige Kochkolben der Chemiker. Auch sauber gereinigte, trockene Milchflaschen eignen sich für unsere gegenüber der vorigen verbesserte Bauart. Wir nehmen statt des Drahtes diesmal eine 3 bis 5 mm starke Messingstange. Sie erhält am oberen Ende

den üblichen Kugel- oder Scheibenabschluß und wird unten meißelartig zugefeilt. Wir stecken sie dann in ein möglichst genau passendes Glasrohr; das soll so lang sein, daß das gefeilte Ende noch frei herausragt.

Auf jede der „Meißel“-Flächen wird mit sehr wenig Eiweiß oder Plastkleber ein Stanniolstreifen (oder was wir sonst benutzen) geklebt, so daß beide Streifen ungeladen dicht nebeneinander herabhängen. Sie sollen so breit wie der Durchmesser des Messingstabes sein. Die Empfindlichkeit können wir wieder durch den außen aufgeklebten U-Streifen Stanniol verstärken. Das Glasrohr mit der Messingstange wird in der üblichen Weise durch Korken oder Gummipropfen geführt und festgehalten.

Der Kolben muß ganz trocken und sauber sein. Will man die Isolation noch weiter verbessern, so überzieht man Glasrohr, Korken und den Rand des Flaschenhalses mit einer Schellacklösung.

Das elektrische Feld hat *Feldlinien*; man kann sie auch sichtbar machen. Die Abbildung auf Seite 177 zeigt die Feldlinien in einem geladenen Elektroskop der eben beschriebenen Bauart. Im Feldteil B zwischen den beiden gleichgeladenen Blättchen herrscht Abstoßung; die Feldlinien zeigen es deutlich. Im Feldteil A zeigen sie ebenso deutlich die Anziehung zwischen Blättchen und äußerem (mit der Erde verbundenem) Stanniolstreifen – am stärksten dort, wo die Entfernung am kleinsten ist.

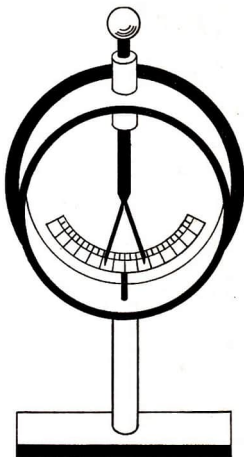
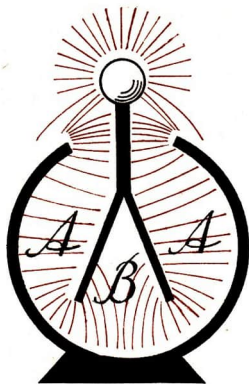
Ein empfindliches Elektroskop im Metallrahmen

Mit dieser sehr vielseitig verwendbaren und empfindlichen Bauart wollen wir die Reihe der Elektroskope abschließen. Das System ist ähnlich wie bei der vorigen Bauart. Wir kleben diesmal die Blättchen nicht an die gefeilten Flächen, sondern machen zunächst einen möglichst feinen Sägeschnitt (etwa 5 mm tief) in der Längsrichtung des Messingstabes; dann feilen wir die Flächen keilförmig zum Schnitt zu, schieben die beiden Blättchen in den Schnitt und klemmen sie dort fest (Schnittseiten zusammendrücken).

Der wichtigste Unterschied ist, daß das System in einem Metallreifen sitzt, der an beiden Seiten durch Glasscheiben abgeschlossen ist.

Der Reifen wird aus 1 bis 1,5 mm starkem Messingblech (notfalls Zink- oder Eisenblech) geschnitten, 5 cm breit und 45 bis 50 cm lang. Dieser Blechstreifen wird zu einem Ring von etwa 15 cm Durchmesser zusammengebogen; die beiden Ränder, die dabei etwa 2 cm überlappen, werden miteinander vernietet oder verlötet. An dieser Stelle wird gleich ein Metallstab befestigt, der den Reifen trägt und mit dem Grundbrett verbindet. An diesem Stab ist ein kleiner Metallhaken angebracht; wenn eine bessere Erdung des Reifens gewünscht wird, kann man hier ein Metallkettchen einhängen.

Oben wird das System im Reifen befestigt. Das geschieht zwar ähnlich wie bei den Flaschen; wir müssen aber bedenken, daß bei dieser Bauart das tragende Material nicht isoliert – im Gegenteil! Es ist ja Blech und nicht Glas. Wir führen den Metallstab am besten durch ein sehr gut isolierendes



*Feldlinien im geladenen Elektroskop –
und ein besonders empfindliches Gerät*

Rohr aus Plastwerkstoff oder Glas und kitten dieses mit gutem rotem Siegelack in einer nicht zu kleinen Öffnung im Reifen fest.

Hinter den Enden der Folienblättchen läßt sich gut eine Skale aus Pappe mit Gradeinteilung anbringen (isoliert, etwa auf einem Stück Siegelackstange). Wir können dann die Größe der einzelnen Ausschläge miteinander vergleichen. Zum Elektrometer reicht es noch nicht ganz; da müßten wir auf feinen Lagern starre Zeiger an Stelle der biegsamen Blättchen einbauen. Der Reifen wird durch je eine Glasscheibe auf beiden Seiten abgeschlossen. Die Scheiben sind etwas größer im Durchmesser als der Reifen; man kann sie mit Siegelack am Reifen ankitten.

Allerlei vergnügliche Wirkungen der elektrischen Ladung

Alle im folgenden beschriebenen Versuche gelingen, wie schon erwähnt, nur bei trockener Luft; feuchte Luft leitet Ladungen ab. Wir müssen immer auf gute Isolierung achten, wenn wir irgendwo Ladungen erzeugen oder festhalten wollen. Soll ein einzelnes Holundermarkkugélchen aufgeladen werden, so kann man es an einem Seidenfaden aufhängen; der Faden reicht als Isolation aus. Zwei Kugélchen, die gleichzeitig und in gleicher Weise (gleichnamig) aufgeladen werden sollen, werden mit dünnen leinenen (nichtisolierenden) Fäden an Metall, etwa Draht, aufgehängt; jetzt muß dieser Draht gut gegen die Erde isoliert werden. Meist geschieht das durch Glasrohre oder Glasstangen, Streifen oder Platten aus Plastwerkstoff oder durch Paraffin (Kerze).

Bei allen Versuchsanordnungen müssen wir daran denken, daß Ladungen auf Leitern, meist Metallen, nur bleiben, wenn die Oberflächen ganz glatt sind und keine scharfen Kanten oder Spitzen haben. Wenn andererseits eine Ladung schnell abgegeben oder aufgenommen werden soll, dann sind die Spitzen gerade richtig.

Beim Experimentieren mit den hier beschriebenen Geräten besteht keine Gefahr für den Experimentierenden; es sind zwar hohe Spannungen, aber nur sehr kleine Stromstärken zu erreichen. Eine Ausnahme bilden die Leidener Flaschen, vor allem die größeren und mehrere zu einer Batterie zusammengeschaltete Flaschen; sie dürfen nur durch einen Entlader mit isolierendem Handgriff entladen werden!

Das Spiel der Ladungen

Die folgenden Versuche sollen uns mit dem Anziehen und dem Abstoßen elektrisch geladener Körper vertraut machen. Wir sehen hier in jedem Falle Wirkungen der Influenz beziehungsweise der Aufladung.

Grundversuche mit Holundermarkkugeln

An einem Drahtgestell, das nicht isoliert ist, hängen wir ein Kügelchen oder einen kleinen Würfel aus Holundermark oder Sonnenblumenmark an einem ganz feinen Natur- oder Kunstseidenfaden auf, an einem zweiten nichtisolierten Drahtgestell ein weiteres Kügelchen an einem Leinenfaden. Wir reiben nun eine Glas- oder Hartgummistange oder einen Plastlöffel vom Salatbesteck mit einem weichen Leder oder mit Wolle und führen das eine Ende der Stange an die erste Kugel. Sie springt an den Stab, läßt sich auf und wird – weil nun gleichartig geladen – schnell abgestoßen. Die nebenstehende Abbildung zeigt den Vorgang schematisch bei positiver Aufladung (Glasstab mit Leder gerieben).

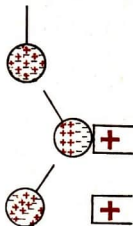
Zunächst ist die Kugel neutral, nähern wir aber die Kugel dem Stab, so sind durch Influenz die Elektronen dem Glasstab zugewandt; die negative Ladung an der einen (rechten) Seite läßt die Kugel auf den positiv geladenen Stab zuspringen. Die Elektronen sausen bei dieser Gelegenheit in großer Zahl auf den Glasstab hinüber und hinterlassen auf der Kugel eine positive Ladung; das heißt aber Elektronenmangel. Der Glasstab, sehr viel größer als das Kügelchen, schluckt den Elektronenzuwachs gern und bleibt trotzdem noch positiv; er ist noch längst nicht gesättigt (neutralisiert). Nun sind Stab und Kugel also positiv geladen; beide stoßen daher einander ab.

Die Kugel läuft jetzt von dem Stab fort. Erst wenn wir sie mit der Hand oder einem Leiter berühren, wird der Anfangszustand wiederhergestellt. Wir können andere isolierende Stoffe reiben und der geladenen Kugel nähern. Wird sie wieder abgestoßen, so haben wir eine positive Ladung erzeugt. Saust die Kugel schnell auf den neuen Stoff (etwa Hartgummistange, mit Wolle oder Katzenfell gerieben) zu, so hat dieser eine negative Ladung. Wir können diesen Versuch auch mit einer negativen Ladung beginnen.

Wenn wir ein größeres, glattes Leder haben (alte Glacéhandschuhe sind auch gut geeignet), dann können wir übrigens leicht nachweisen, daß es nicht auf das Reiben ankommt, sondern auf das Andrücken des Stabes und nachfolgendes Abheben vom Leder. Wir rollen also den Stab über das Leder und drücken ihn dabei an; wir hören auch hier das feine Knistern der elektrischen Entladungen und beobachten, wie Stab und Leder einander anziehen. Der anschließende Versuch mit dem Kügelchen zeigt, wie stark der Stab durch das Abrollen aufgeladen wurde.

Jetzt nähern wir den geladenen Stab dem zweiten, am Leinenfaden hängenden Kügelchen: Dieses springt auch an den Stab – bleibt aber daran hängen und wird nicht abgestoßen. Auch wenn wir den Stab kurz abziehen und dann wieder nähern, haftet die Kugel sofort wieder daran. Das ist ganz anders als bei der Kugel am Seidenfaden. Warum?

Der im Beispiel oben rechts abgebildete verdrängte positive Teil der Kugelladung (der Stabladung gleichartig) kann diesmal über den leitenden Leinenfaden entweichen. Eine negative Ladung bleibt in der Kugel zurück, auch wenn Elektronen auf den Stab überspringen – Elektronennachschub kommt über den Leinenfaden! Auf diese Weise wird allerdings der Stab bald gesättigt; er kann die Kugel nicht mehr anziehen.



*Der Grundversuch
mit Holundermark-
kugeln*

Laden wir zwei Kugeln, die über Seidenfäden an zwei Gestellen hängen, einmal gleichartig und einmal entgegengesetzt auf, so können wir sehr gut die Abstoßung und die Anziehung zwischen ihnen sehen.

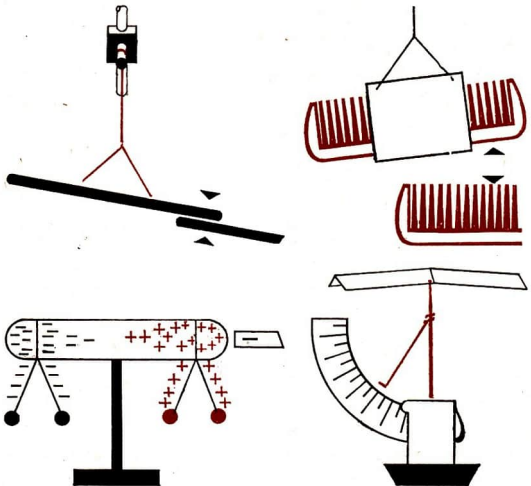
Im großen kann man sehr eindrucksvoll die Abstoßung an zwei luftgefüllten Kinderballons hervorrufen, die nebeneinander an je einem 2 m langen Seidenfaden hängen. Man braucht nur die Hände an beide Luftballons anzudrücken und wieder abzuziehen – schon springen beide Ballons voneinander weg, und man hat (bei trockener Luft) Mühe, sie wieder zusammenzubringen. Noch stärker ist die Wirkung, wenn man sie mit geriebenen Stangen auflädt.

Beim „Fidibus-Elektroskop“ dient ein zweimal gefalteter Papierstreifen auf einer Nadel als Zeiger.

Die Abstoßung gleichartiger und die Anziehung entgegengesetzter Ladungen läßt sich sehr deutlich an einem Stab zeigen, der geladen auf einen an Seidenfäden hängenden Drahthalter gelegt wird, oder an einem Kamm, der geladen in eine an Seidenfäden aufgehängte Papierschlaufe gesteckt wird.

Sehr deutlich läßt sich die *Influenz* elektrischer Ladungen an einem Messingrohr beobachten, das an beiden Seiten mit einer Metallkugel abgeschlossen ist und auf einem Glasstab steht. An beiden Enden hängt je ein Holundermarkkugeln-Paar an einem Leinenfaden (als Elektroskop).

Versuche zur Abstoßung



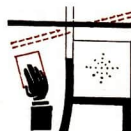
Bringen wir beispielsweise einen geriebenen Hartgummistab, also eine negative Ladung, in die Nähe einer der beiden Metallkugeln, so entsteht in dieser eine entgegengesetzte, positive Ladung. In der anderen Metallkugel bildet sich aus den verdrängten Elektronen eine negative Ladung. Beide Ladungen werden durch Spreizen der Holundermarkkugeln gemeldet. Entfernen wir den Hartgummistab, so sinken die Kügelchen wieder zusammen.

Was geschieht, wenn wir die linke Metallkugel während der Influenz mit dem Finger berühren?

Daß während der Influenz zwei verschiedene Ladungen von den Kügelchen angezeigt werden, können wir mit einem anderen geriebenen Stab nachweisen. Ein (zweiter) geriebener Hartgummistab stößt die linken Kügelchen ab und zieht die rechten an.

Bei diesem Versuch haben wir den geladenen Stab nur genähert. Wenn wir eine Ladung für längere Zeit übertragen wollen, berühren wir bekanntlich den aufzuladenden Körper, beispielsweise ein Elektroskop; dabei ziehen wir den geladenen Stab seiner ganzen Länge nach an der Konduktorkugel entlang, um möglichst viel Ladung zu übertragen.

*Der folgsame
Spazierstock*



Der folgsame Spazierstock

Wir legen einen Spazierstock oder Besenstiel so auf eine Stuhllehne, daß er im Gleichgewicht ist. Kommen wir mit einem geladenen Gegenstand (Filmfolie, Zeitung, Stab und so weiter) in die Nähe, so wird der Stock angezogen. Wir kennen die Ursache: die Influenz – wie beim Holundermarkkugeln an Leinenfaden und Drahtgestell. Aber warum wirkt sich hier das doch gegenüber dem Kügelchen sehr beachtliche Gewicht des Stockes nicht aus? Wenn wir Zeitungspapier benutzen, so wärmen wir es auf dem Kachelofen oder mit dem Bügeleisen an, um es zu trocknen. Dann wird das heiße Papier auf dem Ofen oder an der Tapete oder auf einer Glasplatte (Fenster, Spiegel) oder auf dem trockenen Tisch etwa zehnmal mit einer Kleiderbürste scharf gestrichen. Es ist nun stark aufgeladen; beim Abziehen von der Unterlage können wir kräftige Funken beobachten. Im Rundfunkgerät sind prasselnde Geräusche zu hören.



*So kann man Asche
beseitigen*

Eine besondere Art, Asche zu beseitigen

Die Hausfrau wird von diesem Verfahren keineswegs begeistert sein – aber der Versuch verblüfft. Wir laden eine Filmfolie, Plastfolie oder Papier auf dem Tisch stark auf und streuen etwas Asche von einer Zigarre oder Zigarette darauf. Heben wir die Folie oder das Papier schnell hoch (was wegen der Anziehung nicht immer ganz leicht ist), so scheint die Asche zu explodieren – so plötzlich springt sie nach allen Seiten hoch. An Stelle der Asche kann man auch Konfetti (aus dem Bürolocher), Watte, Flaumfedern, Holundermarkstückchen, Korkstückchen oder ähnliches nehmen.

Wenn man keine Kleiderbürste zur Hand hat, kann man ein Tuch oder die trockene Hand zum Reiben benutzen. Man muß überhaupt bei all diesen Versuchen alle möglichen Dinge miteinander sinnvoll verbinden, neue Zusammenhänge herstellen, kombinieren; dann erst erfüllen die Experimente ihren Zweck.

Wir erweitern den Ascheversuch

Zunächst die Frage: Warum springt die Asche? Die Reibungselektrizität in der Folie läßt durch Influenz in der Tischoberfläche eine entgegengesetzte Ladung entstehen; sie ist bei dem winzigen Abstand noch klein und außerdem durch die Influenzspannung im Tisch gebunden. Heben wir die Folie ab, so bildet sich sofort zwischen Folie und Tisch ein größeres Feld mit einer viel höheren Spannung aus; durch diese werden die (sofort gleichartig geladenen) Ascheteilchen abgestoßen.

Wir stellen auf die geriebene Folie eine oben offene Blechdose und legen die „Springteilchen“, diese Körperchen, hinein. Heben wir jetzt die Folie plötzlich hoch, so springt nichts mehr hinaus; die leitenden Blechwände verhindern, daß in der Dose ein Spannungsfeld entsteht. Man nennt diese Einrichtung, die einen bestimmten Raum spannungsfrei macht, einen *Faradayschen Käfig*. Im großen wird er durch engmaschige Metallnetze, die gerundet sind, hergestellt; manchmal – in physikalischen Instituten – umgibt man ein ganzes Zimmer mit solchen Netzen, einschließlich der Fenster und Türen.

Nehmen wir statt der Blechdose eine offene Pappdose, so springen die Teilchen wieder; die nichtleitende Pappe schirmt nicht ab. Wir laden die Folie wieder auf, stellen jetzt die Blechdose mit dem Boden nach oben darauf und bestreuen diesen mit den Körperchen. Wir heben die Folie hoch – und die Teilchen springen wieder. Die Ladung kommt durch die runde Dose (Leiter!) praktisch verlustlos zu ihnen, und diesmal sind keine schirmenden Wände da.

Nunmehr legen wir auf die geladene Folie eine leichte, geschlossene Pappschachtel (Zigaretenschachtel) und streuen darauf die Asche. Wird die Folie emporgehoben, so springt die Asche wieder, aber nicht mehr so stark wie bei dem Versuch ohne Schachtel. Nehmen wir eine größere Schachtel, das heißt einen noch größeren Abstand zwischen Folie und Asche, so wird das Springen noch schwächer.

Das ist eine wichtige Erkenntnis: Wir beobachten hier die *Abnahme des elektrostatischen Potentials*, wie der Physiker das nennt. Das ist eine mathematische Funktion, die den Zustand eines elektrischen Feldes (Abnahme der Spannung mit der Entfernung!) um einen geladenen Körper beschreibt.

Freilich ist es nicht ganz leicht, die Unterschiede in der Springkraft der Teilchen genauer festzustellen. Wir können auch hier ein Elektroskop benutzen, beispielsweise in folgender Weise: Statt der Asche legen wir ein Stück Stanniol auf die Schachtel (etwas kleiner als deren Fläche); wir können die Spannung messen, wenn wir die Stanniolfläche durch einen Entlader mit dem Elektroskop von Fall zu Fall verbinden.

Fröhliche Wasserspiele mit ernstem Hintergrund

Wir halten in die Nähe eines dünnen, gleichmäßigen Wasserstrahls einen geladenen Stab oder Kamm: Der Strahl wird stark angezogen. Dabei ist es gleich, ob wir mit einer positiven oder negativen Ladung kommen. Die Influenz sorgt für entgegengesetzte Ladung auf der Wasserhaut, und die verdrängte, der Stablading gleichartige Ladung entweicht leicht durch den zusammenhängenden, leitenden Wasserstrahl und das Rohr in die Erde. Aus diesem Grunde bleibt die Anziehung, solange der Stab oder Kamm noch eine Ladung hat; der Strahl wird nicht abgestoßen. Berührt der Wasserstrahl aber den Stab oder Kamm, so wird dieser entladen, und der Strahl läuft wieder seinen gewöhnlichen Weg.

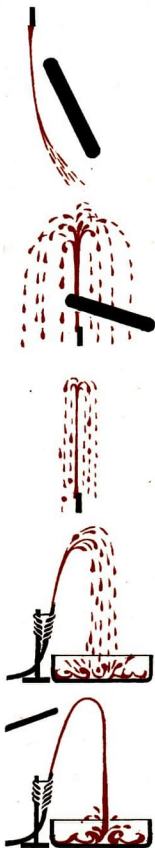
Wir bauen einen Springbrunnen mit dünnem, senkrechtem Wasserstrahl, 50 bis 80 cm hoch. Oben löst sich der Strahl in Tropfen auf, die in der Nähe des Strahls herabfallen. Nähern wir unten (an der Düse) dem Strahl einen geladenen Stab, so setzt die Tropfenbildung früher, tiefer ein; die Tropfen sind größer und schwerer und verteilen sich beim Herabfallen auf einen größeren Umkreis. Die Düse stellen wir aus einem Glasrohr her, das wir in der Flamme etwas auseinanderziehen. Es ist dabei völlig gleich, ob wir eine positive oder negative Ladung nähern; wir müssen nur den Stab (durch Überdecken mit Pappe) vor den Tropfen schützen.

Was ist mit unserem Wasserstrahl im elektrischen Feld geschehen? Durch die Aufladung stoßen die Wasserteile einander so weit wie möglich ab; die Tropfen bilden sich schon früher, in geringerer Höhe als beim ungeladenen Strahl. Dadurch werden sie zugleich dicker und fallen, weil sie mehr Bewegungsenergie als am oberen Ende des Strahls haben, teilweise weiter außen herunter.

Beim vorergehenden Versuch erzeugten wir einen senkrechten, einheitlichen Wasserstrahl. Zur Abwechslung bauen wir jetzt mit einer sehr kleinen Düse (1 bis 2 mm Durchmesser) einen Springbrunnen aus mehreren dünnen Strahlen; die Düsenöffnung ist senkrecht nach oben oder etwas schräg zur Senkrechten gerichtet.

Zunächst sprüht der Brunnen in mehreren feinen Wasserfäden. Bringen wir einen elektrisch geladenen Körper in die Nähe, so vereinigen sich die Fäden zu einem einzigen Strahl, und die vorher vorhandenen zahlreichen kleinen Tropfen werden zu dicken Tropfen in entsprechend geringerer Zahl; mehrere kleine Tropfen vereinigen sich jeweils zu einem einzigen großen.

Wir beobachten die Bildung solcher dicker Tropfen in kleiner Zahl in der Natur beim Gewitterregen; da besteht zwischen Regenwolke und Erde ein starkes elektrisches Feld mit entsprechender Spannung. Man kann das so erklären: Im elektrischen Feld befinden sich die Körper, Wasserfäden und Tropfen, zwischen den entgegengesetzt geladenen Polen, beim Gewitter zwischen der positiv geladenen Wolke und der negativ geladenen Erde. In den Wasserkörpern wird daher durch Influenz die eine Hälfte negativ, die andere positiv geladen. Wenn entgegengesetzt geladene Seiten zweier Wassertropfen einander nahe kommen, so ziehen sie sich gegenseitig an und bilden einen neuen, größeren Tropfen. Das gilt auch für die dünnen Was-



serfäden. Wir führen bei diesem Versuch den Stab von oben an den Springbrunnen.

Eine weitere Ursache zu der genannten Erscheinung ist darin zu suchen, daß die (uns ja sehr geläufige) Oberflächenspannung des Wassers kleiner wird, sobald ein elektrisches Feld auftritt. Wir können das leicht in einem Versuch prüfen:

Wir lassen an einem kleinen Wasserhahn oder einer Düse einen möglichst großen Wassertropfen entstehen und hängen. Er rührt sich nicht; die Oberflächenspannung hält das Wasser zusammen. Jetzt bringen wir einen geladenen Stab in die Nähe – sofort fällt der Tropfen ab. Die durch das elektrische Feld verringerte Oberflächenspannung reicht nun nicht mehr aus, um das Gewicht des Wassers auszugleichen. Diese „Wasserspiele“ sind alle leichter zu lesen als durchzuführen; man muß dabei manchmal etwas Geduld haben und den Stab wieder schön trockenreiben!

Das springende Öl

John Tyndall beschreibt 1884 in einem Buch folgenden Versuch: Man füllt ein flaches Uhrglas mit Speiseöl, bis sich dieses über den Rand wölbt (Oberflächenspannung!). Nähert man dem Uhrglas einen stark geladenen Hartgummi- oder Siegellackstab, so springen Öltropfen in Form eines Strahls zum Stab über.

Das schwebende Watteflöckchen

Diesen Versuch hat schon Otto von Guericke gemacht: Wir laden eine isoliert aufgestellte, runde Metallplatte (ohne scharfe Kanten oder gar Spitzen!) mit der Elektrisiermaschine oder dem Bandgenerator auf und lassen ein Watteflöckchen auf die Platte fallen. Wer einen Elektrophor sein eigen nennt, der lädt ihn auf, hebt den Deckel ab, dreht ihn mit dem Griff nach unten und macht jetzt den Versuch. Das Wattestückchen lädt sich bei der Berührung mit der Platte gleichnamig auf, stößt sich daher sofort ab und bleibt schwebend in einer Höhe, in der sich sein Gewicht und die abstoßende elektrostatische Kraft die Waage halten.

Das elektrische Feld mit geladenen Seifenblasen

Die elektrischen Feldlinien lassen sich sehr überzeugend und zugleich vernünftig durch einen Versuch nachweisen, den auch der irische Physiker John Tyndall (1820 bis 1893) gemacht hat. Zwei Personen, die einander in etwa 2 m Entfernung auf Isolierschemeln (oder Stühlen auf Glasfüßen) gegenüberstehen, erzeugen Seifenblasen. Der eine Experimentator wird mit dem negativen, der andere mit dem positiven Pol einer Elektrisiermaschine oder eines Bandgenerators verbunden. So werden beide Personen entgegengesetzt elektrisch geladen – und mit ihnen die Seifenblasen, jede

mit der gleichartigen Ladung wie ihr „Bläser“; jede Seifenblase wird deshalb von diesem abgestoßen, ehe sie sehr groß wird.

Dafür fliegen die Seifenblasen aber mit ihrer Ladung – und mit ebenfalls geladenem Seifenschaum – auf den Kraftlinienbahnen zum Gegenpol, ins Gesicht des gegenüberstehenden Experimentators (das sich ja hinterher wieder trocken läßt). Manche fliegen auf dem kürzesten Wege, andere – von gleichartig geladenen Nachbarn abgestoßen – auf größerem Bogen, auf höheren oder tieferen Bahnen; alle zusammen geben ein gutes Bild des räumlichen elektrischen Feldes. Treffen zwei Seifenblasen mit verschiedenartiger Ladung aufeinander, so entladen sie sich und fallen zu Boden.

Die tanzenden Männchen

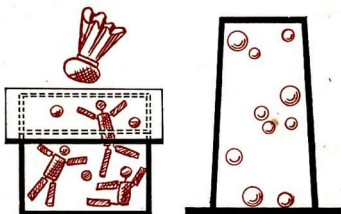
In einen flachen Blechkasten legen wir kleine Figuren aus Holundermark oder Papier, möglichst mit beweglichen Gliedern an Zwirnsfäden; etwa Schlangen, Kugeln und dergleichen mehr. Wir decken den Kasten mit einem sauberen Glas zu und reiben mit Leder oder Seide – schon erheben sich die Figuren und führen groteske Tänze auf, dem Naturgesetz von Anziehung und Abstoßung folgend.

Wer keinen Kasten hat, legt die Glasscheibe mit den Enden auf zwei Bücher; der Tisch wirkt elektrisch als Erde.

Wer eine Elektrisiermaschine hat, kann das Schauspiel noch eindrucksvoller machen. Er hängt an den Konduktor eine runde Blechscheibe oder ein mit Stanniol beklebtes Pappstück, 5 bis 6 cm über dem Tisch. Darunter – auf den Tisch – legt er ein möglichst glattes Stanniolblatt; auf dieses werden die „Schauspieler“ gelegt. Das Stanniol wird am besten noch mit dem Reibzeug verbunden. Wird die Maschine in Betrieb genommen, so beginnt alsbald der ergötzliche Tanz. Die Figürchen werden angezogen, laden sich gleichnamig auf, werden abgestoßen und geben ihre Ladung ab – und das Spiel beginnt von neuem. Die physikalische Erklärung: „Die Figürchen müssen nur die Ladung ausgleichen“ wirkt geradezu ernüchternd, ist aber notwendig. Wir wollen ja stets die Ursache wissen!

Elektrischer Kugeltanz im Glas

Diese Holundermarkkugeln wollen auch nur Ladung ausgleichen. Ein gewöhnliches Trinkglas oder Becherglas wird von innen am Konduktor der Elektrisiermaschine stark aufgeladen; da Glas ein Nichtleiter ist, muß man den Konduktor möglichst viele Stellen der Innenseite berühren lassen. Auf ein Stanniolblatt (größer als die Glasöffnung) hat man die Markkugeln gelegt. Stülpt man das geladene Glas über die Kugeln, so beginnen diese sofort hin und her, auf und ab, kreuz und quer durch das Glas zu toben. In dieser Art gibt es noch zahlreiche Anordnungen.



*Vergnügliche Wirkungen
der elektrischen Ladung*

Trockene Luft wird leitend

Das bewirkt eine offene Flamme, etwa die eines Bunsenbrenners, eines Spiritusbrenners oder einer Kerze. Laden wir ein Elektroskop auf und bringen wir eine Flamme in die Nähe, so entweicht die Ladung schnell, und das Gerät zeigt den Vorgang auch an. Man nennt ihn *Ionisation*; er spielt in Forschung und Technik eine große Rolle. Atome und Moleküle, die ungeladen sind, werden zu Ladungsträgern, *Ionen* genannt. Mit der Ladung „auf dem Rücken“ fangen die Ionen nämlich an, sich in Richtung auf die entgegengesetzten Ladungen zu bewegen – zu wandern. Ionen kommt aus dem Griechischen und heißt „die Wandernden“.

Uns geht das hier nur kurz aus zweierlei Gründen an: Wir vermeiden offene Flammen in der Nähe unserer Versuchsteile; wollen wir jedoch ein Teil – etwa einen geriebenen Stab – sehr schnell von der Ladung befreien, dann brauchen wir es nur schnell durch eine Flamme zu ziehen. Wir können auch ohne Schwierigkeiten zeigen, daß wir in Gegenwart von Flammen längere Funken als sonst aus einer Elektrisiermaschine ziehen können.

Elektrizität läßt sich „löffeln“

Diese „Löffelei“ ist eigentlich weniger ein Versuch als vielmehr ein Verfahren. Wollen wir die Ladung einer Leidener Flasche auf zwei solcher Flaschen verteilen, so stellen wir beide nebeneinander auf eine leitende Unterlage, etwa Stanniol, und verbinden beide Konduktorkugeln durch den Entlader miteinander; daran ist nichts Besonderes. Wenn wir jedoch einen Körper auf seine Ladung prüfen wollen und ihn zu diesem Zweck mit dem Elektroskop verbinden, dann kann es geschehen, daß das Meßgerät zu empfindlich ist und überlastet wird.

In solchen Fällen bekommt das Elektroskop die Ladung löffelweise – wie ein Kranker seine Medizin! Der „elektrische Löffel“ ist nichts anderes als ein isolierter, abgerundeter Metallkörper, der wegen seiner geringen Größe nur eine kleine Ladung aufnehmen und damit auch übertragen kann. Es kann ein Probestäbchen sein: ein rundgefeiltes Stück eines starken Drahts, mit Plastkleber in einem Glasrohr (als Griff) befestigt.

Größere Löffel stellt man dadurch her, daß man eine Glaskugel vom Weihnachtsbaum mit Aluminiumbronze überzieht und in der Öffnung eine Stricknadel oder ein Trinkröhrchen aus Kunststoff mit Plastleim befestigt. Auch ein Tischtennisball läßt sich auf diese Weise dazu herrichten. Kleine Glasampullen, möglichst kugelförmig, bronziert man nur am dicken Ende; das frei bleibende Ende, an dem die abgebrochene Spitze gesessen hat, dient als Griff (kurz anschmelzen, damit man sich nicht in den Finger schneidet!).

Mit Hilfe eines solchen Löffels kann man das Umlöffeln von Ladung sehr schön an drei nebeneinanderstehenden Elektroskopen zeigen: E 1 wird aufgeladen. Mit dem Löffel berühren wir E 1, nehmen „etwas Elektrizität“ ab und geben sie an E 2 weiter. Der Ausschlag von E 1 geht zurück; E 2 schlägt aus. Der Löffel und E 2 haben jetzt die gleiche Spannung gegenüber E 1; E 3 erhält vom Löffel weniger Ladung als E 2, weil der Löffel ja selbst immer einen Teil der Ladung zurückbehält. Laden wir den Löffel wieder an E 1 auf, so braucht er diesmal weniger Ladung. Auf solche Weise können wir die Ladung gleichmäßig auf die drei Elektroskope verteilen.

Entladung „mit Effekt“

In den folgenden Experimenten wollen wir uns nun der Entladung zuwenden. Auch sie hält manches Reizvolle für uns bereit.

Der Mensch im Mittelpunkt

Daß man bereits – mit Elektroskopen nachweisbar – elektrisch geladen wird, wenn man mit Gummisohlen auf eine Isolierplatte tritt, ist schon erwähnt worden. Wir können leicht die Versuche wiederholen, an denen sich schon unsere Vorfahren ergötzt haben: Wir treten auf eine Isolierplatte, Glasscheibe oder auf ein auf drei oder mehr Glasflaschen ruhendes Brett, *Isolierschemel* genannt. Meist genügt es auch, trockene und heile Gummischuhe anzuziehen. Nun fassen wir an den Konduktor einer Elektrisiermaschine und lassen uns (bei geerdetem Reibzeug) aufladen; mit einem Stab würde es bei der großen Körperoberfläche des Menschen zu lange dauern.

Kommt uns jemand auf Ledersohlen zu nahe, so geht unsere Ladung über ihn in die Erde; wir können mit einem Finger ziemlich lange Funken an irgendeiner Stelle aus unserem „geerdeten“ Nachbarn ziehen. Solche Versuche wirken naturgemäß am stärksten, wenn der Partner nichts ahnt. Es besteht dann die Gefahr, daß er dabei nicht nur elektrisch, sondern auch auf uns „geladen“ wird. . . . Man tröstet ihn durch den Hinweis, daß man selber die Schläge ebensostark spürt und daß sie ungefährlich sind. Niemand darf man solche Versuche aber mit Leidener Flaschen machen!

Wer Sehnsucht nach einem Heiligenschein hat, dem kann geholfen werden: Man biegt aus Draht einen entsprechenden Ring, umwickelt ihn mit einer



möglichst rauen metallhaltigen Schnur (für Weihnachtsgeschenke viel benutzt) und verbindet ihn mit dem Konduktor. Gehalten wird der Ring an einem Glasstab, oder er wird an seidenen Fäden aufgehängt. Im Dunkeln strahlen herrliche Lichtbüschel aus dem Ring; und doch ist dem „Heiligen“ nicht ganz wohl dabei: Ihm sträuben sich nämlich die Haare (dem Ring entgegen)! Das ist die gleiche Strahlungs- oder Glimmerscheinung, wie sie bei Gewitter an den Blitzableitern und an den Mastspitzen und anderen Spitzen der Schiffe als sogenanntes St.-Elms-Feuer zu beobachten ist. Es ist eine *Spitzenentladung*. Haarsträubend wird die Sache auch, wenn wir jemandem eine geladene Filmfolie über den Kopf halten; und wenn wir einen geladenen Stab unter der Nase entlangziehen, spüren wir einen ganz feinen Geruch von Ozon (O_3), das durch die Funken aus Sauerstoff (O_2) entstanden ist.

Elektrischer Rückstoß

Die Kraft des mechanischen Rückstoßes kennen wir bereits (Seite 93). Wir wissen auch, daß elektrische Ladungen aus Spitzen schnell ausströmen oder in die Spitzen einströmen; daher werden die Ladungssammler spitzenfrei gebaut, und die Gabeln an der Elektrisiermaschine erhalten Spitzen, weil sie die Ladung der Scheibe aufsaugen sollen.

Es erscheint kaum glaublich, aber es ist so: Beim Ausströmen der Ladung aus einer Spitze entsteht ein Rückstoß – wie beim Austritt von Gas oder Wasser aus einer Düse, nur viel, viel kleiner. Wir können das mit dem elektrischen Windrad sogar nachweisen; es erinnert uns an das Segnersche Wasserrad.

Das Windrad wird aus dünnem Aluminiumblech mit sehr scharfen Spitzen ausgeschnitten und genau in der Mitte gekörnt. Es liegt ganz leicht beweglich auf einer Nadel, die in einer Kerze steckt. Die Ladung einer Elektrisiermaschine – der Konduktor wird mit der Nadel, das Reibzeug mit der Erde verbunden – läßt das Windrad sich drehen: Rückstoß durch die aus den Spitzen strömende Ladung. Manchmal wird es nötig sein, das Windrad durch leichtes Anhauchen „anzulassen“.

Mit einiger Geschicklichkeit kann man ein doppeltes Windrad senkrecht in der Art von Windmühlenflügeln bauen.

Man kann das Windrad auch aus einer Rasierklinge herstellen. Man überklebt dazu an zwei gegenüberliegenden Ecken die Schneiden bis zur Mitte mit Papier. Ein Druckknopf in der Mitte der Klinge liefert das Lager. Warum läuft auch dieses Windrad an der Elektrisiermaschine oder am Bandgenerator?

Der elektrische Wind

Mit der aus einer Spitze ausströmenden elektrischen Ladung läßt sich eine Kerzenflamme beiseite drücken, ja sogar ausblasen (wenn die Ladung groß

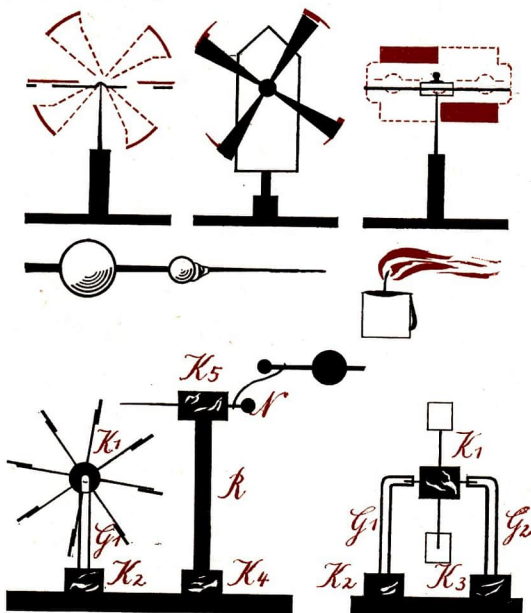
und die Flamme klein ist). Wir brauchen nur eine Nähnadel am Konduktor der Elektrisiermaschine zu befestigen. Übrigens spürt man den Wind deutlich, wenn man die feuchte Handfläche dicht vor die Nadelspitze hält.

Eine elektrische Windturbine

Die untenstehende Abbildung zeigt eine kleine elektrische Windturbine. K_1 bis K_5 sind Korken. Die Blaseinrichtung mit der Spitze, die mit dem Konduktor verbunden wird, ist einfach: Zwei Korken, K_4 und K_5 , Glasrohr G und eine Nadel N , an der Rückseite mit einer Kugel versehen, damit der elektrische Wind nicht an der falschen Seite ausströmt.

Wir wissen doch: Um das unerwünschte Ausströmen der Ladungen zu verhindern, werden die Konduktoren der Ladungssammler und Elektroskope ebenfalls als Kugeln oder Scheiben mit abgerundeten Kanten gebaut.

Elektrostatische Windräder



Das Turbinenrad besteht aus einem Korken K_1 , in dem symmetrisch acht oder mehr Stopfnadeln stecken. Diese haben an den Enden Flügelchen aus Papier, mit Plastleim angeklebt. Der rechte Teil des Bildes zeigt die durch die Mitte des Korkens K_1 laufende Achse (Stopfnadel) und ihre Lagerung in zwei gebogenen Glasröhren G_1 und G_2 . Die Gesamthöhe des Gerätes vom Grundbrett bis zum Korken K_8 ist 15 cm; die Massen müssen geringgehalten werden.

Das Reibzeug wird wieder geerdet; notfalls wird das Turbinchen durch vorsichtiges Anhauchen in erste Umdrehung versetzt. Wichtig ist, daß das Turbinenrad gut ausgewuchtet ist, das heißt in jeder Stellung stehenbleiben kann. In der Praxis gibt es Turbinen dieser Art übrigens nicht; dazu ist die Rückstoßwirkung zu schwach.

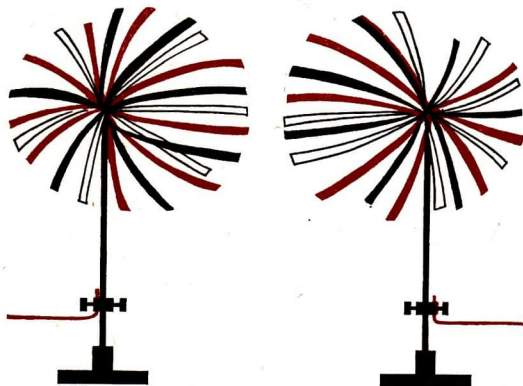
Papierbüschel deuten Feldlinien an

Zunächst ist die Sache mit dem Papierbüschel ein ganz einfacher Versuch: Man bindet ein Büschel von Seidenpapierstreifen an einen Draht und steckt diesen in unsere isolierende Kerze. Sobald wir eine Ladung an den Draht bringen, sträubt sich das Büschel ähnlich wie die Haare eines Menschen, der auf dem Isolierschemel steht und geladen wird. Die Streifen gehen bei Ladung gleichmäßig nach allen Seiten auseinander. Insofern ist das Papierbüschel eigentlich ein Elektroskop; man kann es durchaus dafür verwenden.

Wir wollen aber mehr, nämlich die *Feldlinien eines elektrischen Feldes* andeutungsweise zeigen! Zu diesem Zweck bauen wir zwei besonders eindrucksvolle Büschel: Auf einer isolierenden Grundplatte (Plast) wird eine kräftige Messingstange von etwa 3 mm Durchmesser und etwa 45 cm Länge befestigt. Sie trägt oben eine runde Metallscheibe von 5,5 cm Durchmesser. Wir schneiden 60 Streifen aus Seidenpapier, etwa 7 mm breit und etwa 30 mm lang. 20 davon kleben wir ringsherum am Rand der Metallscheibe fest; das ergibt die erste Lage. Darüber, um eine halbe Streifenbreite versetzt, werden wieder 20 Streifen als zweite Lage geklebt – und schließlich folgen die letzten 20 als dritte Lage. Damit ist das Büschel fertig; wir müssen nun noch ein zweites, gleiches herstellen.

Zum ersten Versuch (Vorversuch) legen wir die starke Ladung einer Elektrisiermaschine oder eines Bandgenerators an die senkrechte Metallstange und erden das Reibzeug. Ergebnis: Die Streifen strecken sich radial in alle Windrichtungen; sie stoßen einander ab, weil sie alle gleichnamig geladen sind. Ein hübsches Bild!

Zum Hauptversuch stellen wir beide Büschel in etwa 70 cm Entfernung voneinander auf und verbinden die Metallstange des einen Büschels mit dem Konduktor und die des anderen mit dem Reibzeug. Verwenden wir einen Bandgenerator, so erden wir das zweite Büschel. Die umstehende Abbildung zeigt, daß sich die Streifen nicht mehr radial gleichmäßig ausbreiten, sondern gebogen „aufeinander zukommen“, die elektrischen Feldlinien andeutend. Auch bei den äußeren Streifen links und rechts ist das zu



Papierbüschel deuten die elektrischen Feldlinien an

beobachten. Die Feldlinien, die wir auf diese Weise nachgewiesen haben, lassen erkennen, daß das elektrische Feld eine Struktur hat und etwa wie diese beschaffen ist. Die Feldlinien treten senkrecht aus der Metallscheibe aus, verlaufen von einer Scheibe zur anderen und kreuzen einander nirgends.

Wir experimentieren mit dem Blitz

Natürlich dient uns nicht der wirkliche Blitz (wie dem Erfinder des Blitzableiters, Benjamin Franklin, Mitte des 18. Jahrhunderts) zu unseren Versuchen; das wäre zu gefährlich. Wir nehmen sein Modell, das alle seine wichtigen Eigenschaften, nur verkleinert, auch hat: *den Funken*.

Wir bauen uns zunächst eine Blitztafel, auch Franklinsche Tafel genannt. Sie besteht aus einer Glasscheibe mit kleinen Stanniolrechtecken oder -scheibchen (mit Bürolocher herzustellen), die hintereinander in Abständen von 0,5 mm auf die Glasscheibe aufgeklebt sind; man bildet dabei Muster oder Buchstaben. Wird das eine Ende der Reihe mit dem Konduktor und das andere mit dem Reibzeug oder der Erde verbunden, so leuchtet die gewünschte Figur auf.

Ein Papphäuschen entsprechend der umstehenden Abbildung, mit abschaltbarem Blitzableiter, zeigt die Blitzwirkung deutlich. Von der Spitze am Turm, dem Blitzableiter, führt eine Leitung zu einer Kugel, die unmittelbar über einem geerdeten Metallschälchen mit wenigen Tropfen Benzin (Vorsicht!) hängt.



Nähern wir den Konduktor oder den dazwischengeschalteten Entlader der Spitze des Blitzableiters, so springt oben und am Schälchen je ein Funke über, und das Benzin wird entzündet. Um die Funken sicher und ausreichend groß zu erhalten, schaltet man am besten eine kleine Leidener Flasche parallel zur Elektrisiermaschine.

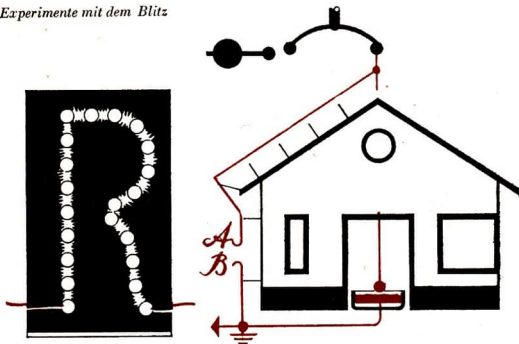
Steckt hier nicht irgendwo ein Fehler? Freilich – dieser Blitzableiter ist gar keiner! Die Leitung durch das Haus entspricht nur den elektrischen Installationen. Der Blitzableiter läuft links außen am Haus hinunter, und er war zwischen A und B unterbrochen, also nicht betriebsfähig! Überbrücken wir diese Lücke und wiederholen den Versuch, so wird die Ladung außen entlang zur Erde (Reibzeug) geführt, und das Benzin wird nicht entzündet, weil im Hause kein Funken mehr auftritt.

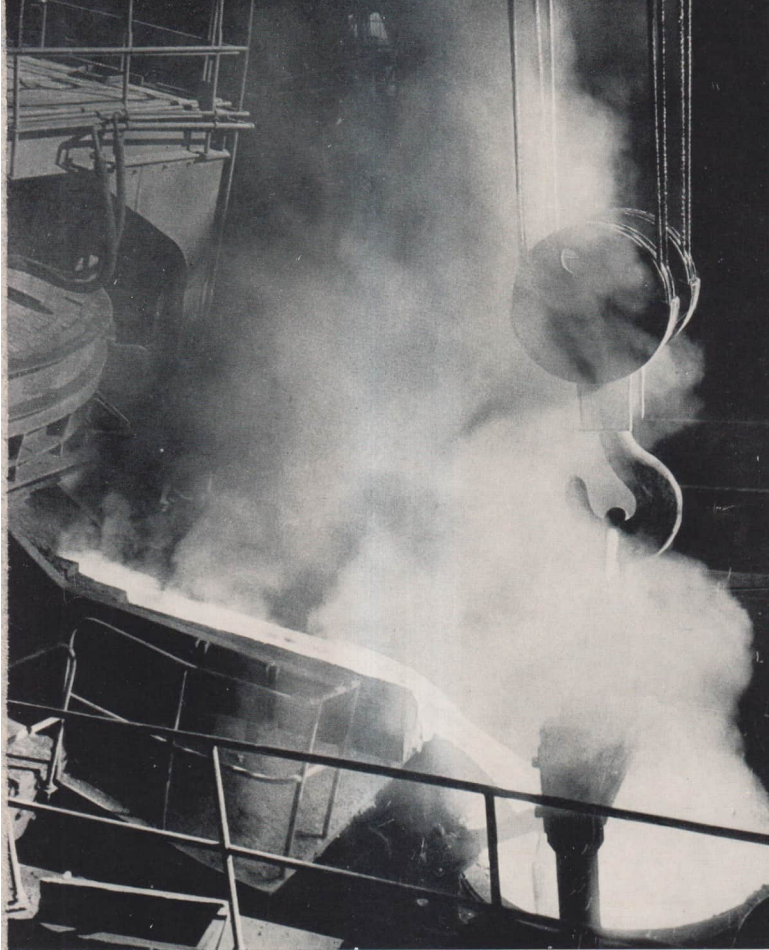
Gewitterblitze sind Entladungen zwischen entgegengesetzt geladenen Wolken (Wolkenblitze) oder zwischen Wolken und Erde (Erdblitze). Im Gegensatz zu unseren kleinen Blitzen, den Funken, verläuft der Gewitterblitz verästelt in aufeinanderfolgenden Entladungsstößen als Linienblitz. Außerdem gibt es den Perlschnurblitz und den geheimnisvollen, seltenen Kugelblitz. Die Erdblitze suchen den kürzesten und bequemsten Weg und schlagen daher in die höchsten Stellen und in die am besten leitenden ein. Der ordnungsgemäß geerdete Blitzableiter bietet ihnen beides. Ein im flachen, freien Gelände gehender Mensch ist bei Gewitter sehr stark gefährdet, er wird durch Influenz (genau wie ein Blitzableiter) entgegengesetzt wie die Wolke aufgeladen.

Die Spannung zwischen Wolke und Erde kann bei einem mittleren Gewitter auf 100 Millionen ($= 10^8$) Volt geschätzt werden, die Stromstärke des



Experimente mit dem Blitz





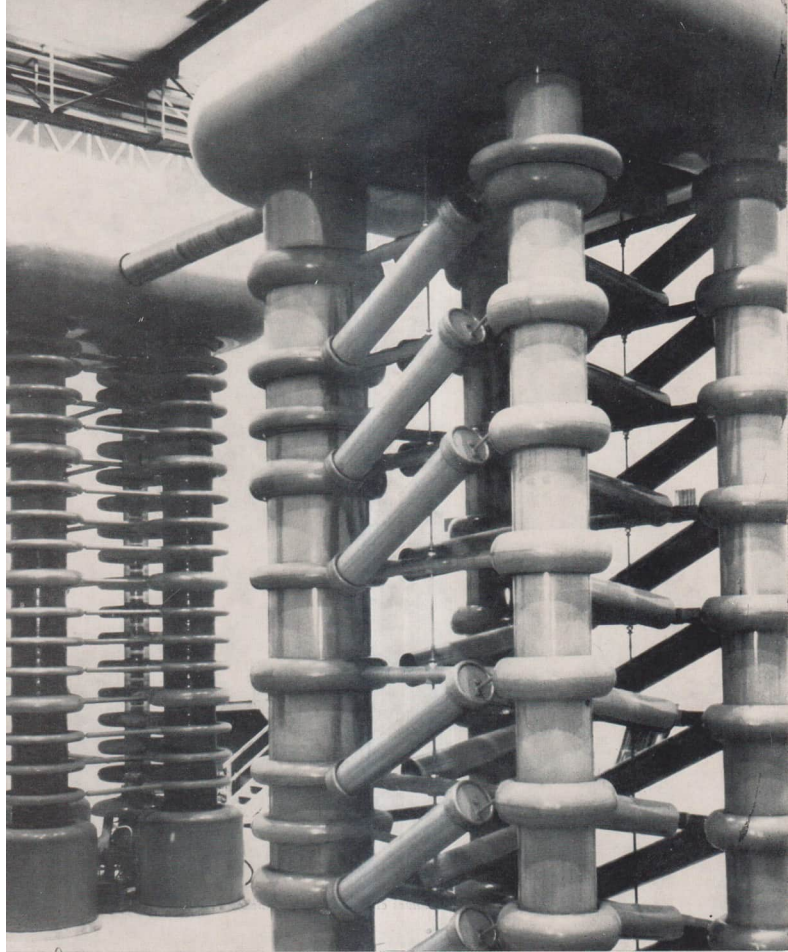
Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes ermöglicht das Schmelzen hochlegierter Edelstähle in den Elektroöfen.





Die Magnetwirkung des elektrischen Stromes ermöglicht ein rationelles Verladen von Eisenteilen.

- ◀ Die chemische Wirkung wird bei der Elektrolyse genutzt. Hier spaltet der elektrische Strom eine Kochsalzlösung in Natronlauge, Chlor und Wasserstoff.



Diese Hochspannungskaskade dient Forschungsarbeiten mit hohen elektrischen Spannungen.

Blitzes zwischen 20000 und 50000 Ampere. Dagegen ist die Dauer des Blitzes sehr kurz; mit einer rasch umlaufenden Kamera hat man 10- bis 100millionstel Sekunden gemessen. Das ergibt eine elektrische Arbeit des Blitzes zwischen 55 und 140 Kilowattstunden. Das ist nicht viel; die oft so verheerenden Wirkungen des Blitzes sind in der hohen Stromstärke begründet, die sich auch in der winzig kurzen Zeit auswirkt.



Ströme und Kräfte

Die strömende Elektrizität

Grundsätzlich besteht kein Unterschied zwischen der ruhenden und der strömenden Elektrizität; alles, was wir von der Ladung, der Spannung, dem Strom, dem Feld und so weiter kennengelernt haben, gilt für beide. Nur hatten wir bei der ruhenden Elektrizität durch die besondere Art der Erzeugung mit sehr hohen Spannungen zu tun.

Immer sind die Elektronen Träger der negativen Elektrizität, bei elektrischem Gleichgewicht ausgeglichen durch die gleich große, positive Ladung des Atomkerns. Wir erinnern uns: Nahmen wir den Atomen einige Elektronen weg, so blieben dementsprechend positive Kernladungen unausgeglichen und einsam zurück. Lagen irgendwo ungebührlich viele Elektronen, so konnten die Kerne sie weder ausgleichen noch (durch die Anziehungskraft der ungleichnamigen Ladung) festhalten; sie entwichen bei der nächsten Gelegenheit dorthin, wo ungesättigte Kerne nach ihnen verlangten. Die strömende Elektrizität hüpfte und springt dabei nicht wie die aufgeschaukelte „ruhende“; sie ist meist nicht so hochgespannt und wird ganz anders erzeugt: durch chemische Batterien und durch umlaufende Spannungserzeuger. Sie strömt durch Leiter, und das sind in erster Linie die Metalle, die „Leiter erster Klasse“, zu denen übrigens auch die Kohle gehört. Die Metalle bestehen aus (meist sehr kleinen) Kristallen. Da ein solcher Kristall gitterförmig im Raum aufgebaut ist, spricht man auch von einem „Raumgitter“.

Wir wollen uns einmal einen Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt vorstellen – sagen wir, einen Meter lang. Die kleinen Kristalle, unregelmäßig verteilt, bilden den Draht. Legen wir seine Enden an eine Batterie, die beispielsweise 5 A Stromstärke abgeben kann, so flösse nach unserer bisherigen Vorstellung – kein Strom. Aber Kupfer ist doch ein Leiter?

Wir müssen unsere Vorstellungen noch ergänzen. Längst nicht alle Elektronen umfahren, wie sich das eigentlich gehört, ihre Kerne, mit denen sie gemeinsam die Atome bilden; nein, viele haben sich aus dem Atomverband gelöst und schwirren kreuz und quer durch die Maschen des Raumgitters – als „Elektronengas“, wie man sagt. Der Ausdruck „Gas“ soll andeuten, daß

die Bewegungen dieser freien Elektronen ähnlich unregelmäßig sind wie die der Moleküle eines Gases.

Die „Flucht der Elektronen in die Freiheit“ hat eine Folge: Die Ladung der Atome ist nicht mehr ausgeglichen; aus Atomen sind durch die nunmehr überwiegende positive Kernladung *positiv geladene Ionen* geworden. Das Kristall eines Metalles betrachten wir daher als ein *Raumgitter aus positiven Metall-Ionen* mit – wie schon erwähnt – einem Elektronengas zwischen seinen Maschen. Ein dickerer Draht hat im Querschnitt infolge der größeren Anzahl von Kristallen mehr freie Elektronen als ein dünner. Solange sich die freien Elektronen ganz unregelmäßig bewegen (je nach der Temperatur des Leiters verschieden schnell), fließt kein Strom. Sobald jedoch an die Enden des Drahtes eine Spannung gelegt wird, bildet sich mit 300 000 km je Sekunde Geschwindigkeit ein *elektrisches Feld* aus – in unserem

Draht von 1 m Länge also in $\frac{1}{300\,000\,000}$ Sekunde. Ebensoschnell hat

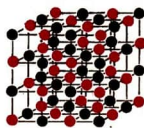
dieses Feld die Elektronen „auf den Marsch gebracht“! Die negativen Elektronen sind plötzlich zwischen zwei Polen, einem negativen und einem positiven, und werden nach dem Gesetz der Anziehung ungleichnamiger Ladungen zum positiven Pol hin in Bewegung gesetzt; sie erhalten eine „Vorzugsrichtung“.

Das Feld stammt beispielsweise von einem Spannungserzeuger. Der nimmt nun (im geschlossenen Stromkreis, der hier ja vorliegt) am positiven Pol die ankommenden Elektronen auf und liefert am negativen Pol ebenso viele Elektronen nach. Diese Maschine hält also das elektrische Feld und damit die Elektronenbewegung aufrecht und erinnert damit an eine Pumpe, die einen Wasserkreislauf (etwa zum Kühlen) in Gang hält.

Der kreisende Elektronenstrom ist unser elektrischer Strom; während seines Strömens übt er Wirkungen aus, mit denen wir uns noch näher beschäftigen werden. Und jetzt kommt etwas sehr Merkwürdiges: *Die einzelnen Elektronen bewegen sich im Leiter ganz langsam*; mit einer Geschwindigkeit von 0,375 mm in der Sekunde schleichen sie einher! Ein Elektron braucht 4,5 Minuten, um unseren 1 m langen Draht zu durchlaufen. Unglaublich! Um das zu verstehen, machen wir einen weiteren Gedankenversuch:

Wir nehmen einen 1 m langen Schlauch oder ein entsprechendes Rohr und füllen Wasser hinein – ganz voll; das eine Ende verschließen wir mit einem Stopfen. Jetzt drücken wir plötzlich am offenen Ende ganz stark auf die Wassersäule im Schlauch. Was wird geschehen (Wasser läßt sich praktisch nicht zusammendrücken)? Der Stopfen am anderen Ende fliegt fast zur selben Zeit hinaus! Aber es sind nicht dieselben Wassermoleküle, die wir drückten und die den Stopfen hinauspreßten, sondern alle Moleküle waren im ganzen Schlauch in Bewegung; die Wassersäule hat sich im ganzen verschoben. Das ist das ganze Geheimnis! Und entsprechend ist es bei der elektrischen Leitung: Sobald wir an die Enden des Drahtes eine Spannung legen, entsteht mit 300 000 km/s Geschwindigkeit im ganzen Draht ein elektrisches Feld, das auf die Elektronen eine *Feldkraft* ausübt und sie zum

• Natrium
• Chlor



So ist ein
Kochsalzkristall
aufgebaut

Strömen in einer Richtung, der Vorzugsrichtung, bringt. Man nennt diese wirkliche Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen bewegen, *Drift*. Genaugenommen müssen wir bei dem Vergleich mit der Wassersäule gleichzeitig an der Stopfenseite saugen, denn die Elektronen werden ja durch die angelegte Spannung an dem einen Ende des Drahtes abgestoßen (–Pol) und am anderen angezogen (+ Pol).

Gute Leiter lassen die Elektronen leichter, schlechte Leiter lassen sie weniger leicht durch ihre Kristalle schlüpfen. Immer müssen die „driftenden“ Elektronen einen Widerstand überwinden, hier weniger, dort mehr, je nach dem Werkstoff des betreffenden Leiters – und nach seiner Temperatur.

Dieser Widerstand ist daran schuld, daß die Drift eine gleichbleibende Geschwindigkeit ist (wenn auch je nach dem Werkstoff verschieden); denn eigentlich müßten die Elektronen durch den ständigen Einfluß der Feldkraft in eine beschleunigte Bewegung geraten. Aber die Elektronen haben es schwer, ihren Weg zu finden, weil ja die Moleküle aller Stoffe in dauernder Bewegung sind (die bekannte Molekularbewegung). Haben die Elektronen bei mäßiger Bewegung der Moleküle schon Mühe, ihren Weg zu bahnen, so stoßen sie bei stärkerer Molekularbewegung noch viel häufiger an – die Wahrscheinlichkeit der Zusammenstöße ist größer geworden. Das heißt nichts anderes, als daß der elektrische Widerstand eines Leiters mit seiner Temperatur wächst!

Bei den Zusammenstößen zwischen Elektron und Materie (den Kristallen) gibt es eine ähnliche Reibung, wie wir sie im ersten Teil dieses Buches behandelt haben, und es gibt, dem Naturgesetz zufolge, auch eine Reibungswärme. Daher werden besonders die Drähte warm, deren „Leitfähigkeit“ für den hindurchgeschickten Strom zu klein oder anders ausgedrückt: deren Widerstand zu groß ist. Wollen wir Wärme auf diese Art erzeugen, dann verwenden wir Drähte mit besonders hohem elektrischem Widerstand, etwa durch Zusätze von Nickel und Mangan.

Damit haben wir eine kennzeichnende Begleiterscheinung des elektrischen Stromes verstanden: die den Strom begleitende *Wärmeentwicklung*. Diese Wirkung haben die Physiker sehr schnell entdeckt. Wir wollen aber zunächst einmal sehen, wie man überhaupt den elektrischen Strom gefunden hat; das ist eine sehr reizvolle Geschichte – und Geschichte im Sinne der Historie zugleich.



Die Frösche des Dr. Galvani

Es fing damit an, daß der italienische Mediziner Luigi Galvani aus Bologna (1737 bis 1798) am 6. November 1789 in seinem Laboratorium mit seinen Assistenten Versuche mit einer starken Reibungselektrisiermaschine machte. Frau Galvani, die – wie die meisten Italiener – gern in Fett gesottene Froschkeulen aß, war krank und sollte zur Stärkung eine Brühe aus Froschkeulen trinken. Galvani als aufmerksamer Gatte besorgte sofort eine Anzahl Frösche und bereitete sie in seinem Arbeitszimmer zu: Er

trennte die Schenkel zusammen mit einem kleinen Teil des Rückens vom Rumpf und zog die Haut ab. Die Nerven, die mit dem kurzen Stück Rückgrat noch verbunden waren, legte er dabei bloß; als Arzt und Professor der Anatomie machte er das schnell und geschickt. Die Assistenten erzeugten am anderen Ende des Tisches mit der Elektrisiermaschine lange Funken. Plötzlich ein Schrei: „Da, der Frosch lebt ja!“ Was war geschehen? Galvani hatte die Schenkelnerven eines präparierten Frosches mit einem Messer berührt und dabei die Klinge angefaßt; ohne es zu bemerken, war er also mit den Nerven elektrisch verbunden. Der Zufall wollte es, daß zur selben Zeit ein Mitarbeiter die Elektrisiermaschine auf demselben Tisch drehte und einen langen Funken zog. Im selben Augenblick „zogen sich alle Muskeln an den Gelenken des Frosches wiederholt derartig zusammen, als wären sie von heftigen Krämpfen befallen“, schreibt Galvani im Jahre darauf in seinem Werk „De viribus electricitatis in motu musculari commentarius“ („Beschreibung der elektrischen Kräfte in der Muskelbewegung“).

Das war ein geschichtlicher Augenblick in der Entwicklung der Naturwissenschaft. Galvani wußte das zwar noch nicht; aber er sah das Neue, das Unbekannte, nach dem „Sichwundern“ begann der Forscher folgerichtig mit dem systematischen Beobachten.

Mit der Elektrizität mußte die neue Sache zu tun haben. Hielt Galvani das Messer an den Froschnerv, ohne daß die Elektrisiermaschine Funken gab, so geschah nichts. Gab sie aber Funken, und Galvanis Hand war nicht durch Anfassen der Klinge oder durch die eiserne Niete, mit denen der beinerne Messergriff befestigt war, mit der Klinge verbunden, so tat sich ebenfalls nichts.

Von der Reibungselektrizität wußten die Gelehrten damals schon eine ganze Menge; sie kannten auch den Unterschied zwischen elektrischen Leitern und Nichtleitern. Mit Hilfe von Metallen und durch den menschlichen Körper konnte man die elektrische Ladung einer Elektrisiermaschine fortleiten; mit Glas, Porzellan, Gummi, Harz, Steinen oder trockenem Holz ging das nicht – und offenbar auch nicht mit dem beinernen Griff des Messers.

Galvani versuchte das alles; er berührte (während Funken erzeugt wurden) die Nerven des Frosches mit einem Glasstäbchen und dann wieder mit einem Eisenstab. Das Ergebnis blieb das gleiche: Die eine Voraussetzung war, daß eine Elektrisiermaschine in der Nähe als besondere Elektrizitätsquelle die wirksamen Funken lieferte; die andere, daß Galvani mit dem Messer den Froschschenkelnerv berührte, also eine Antenne darstellte, mit der die von der Elektrisiermaschine ausgehenden elektrischen Schwingungen aufgefangen wurden. Diese erzeugten im Froschschenkel einen elektrischen Strom, der die Zuckungen hervorrief. Eine verwickelte und noch lange Jahrzehnte hindurch ganz unerklärliche Erscheinung; erst 1888 entdeckte der deutsche Physiker Heinrich Hertz die elektrischen Wellen. Es war gut, daß Galvani sehr bald lernte, die Zuckungen des Froschschenkels mit Hilfe zweier verschiedener Metalle zu erzeugen; auf diesem Wege konnte die frühe Forschung folgerichtig weitergehen und zur Entdeckung der strömenden Elektrizität führen.

Daß die Funken einer Elektrisiermaschine und die Blitze beim Gewitter eng miteinander verwandt waren, wußte man schon. Benjamin Franklin, nordamerikanischer Staatsmann und Physiker (1706 bis 1790), hatte sich mit den natürlichen elektrischen Entladungen bei Gewittern beschäftigt und 1750 den Blitzableiter erfunden. Er hatte auch den Unterschied zwischen positiver und negativer Elektrizität entdeckt und den elektrischen Kondensator erfunden, in dem man die elektrische Ladung speichern kann.

Galvani konnte als Forscher vergleichen und folgern. Er kam sehr bald auf den Gedanken, an Stelle der Funken seiner Elektrisiermaschine den Blitz zu benutzen. Ein kühnes Unterfangen, denn er mußte nun eine Art Blitzableiter bauen! Um es vorwegzunehmen: Es ist nichts Schlimmes geschehen. Etwas Glück gehört auch zum Forschen!

Galvani spannte oben an seinem Hause einen Eisendraht aus und isolierte ihn gegen die Befestigungsstellen. An diesem Draht hängte er Froschschenkel an ihren Nerven mit Hilfe von Messinghaken auf. Die Füße der Frösche verband er durch einen weiteren Eisendraht mit der Erde; dieser Draht reichte bis in das Wasser eines Brunnens. Technisch war das nicht leicht, weil der Erdleitungsdraht mit seinem Gewicht nicht die Froschnerven abreißen durfte. Galvani war jedoch ein geübter Experimentator mit einer geschickten Hand; er baute den Versuch ohne nennenswerte Schwierigkeiten auf.

Das Experiment gelang. Jedesmal wenn ein Blitz aufleuchtete, gerieten die Froschmuskeln im selben Augenblick in wiederholte heftige Zuckungen; der Donner kam je nach der Entfernung des Gewitters später an.

Zum Arbeitszimmer Galvanis gehörte ein Balkon mit einem Eisengitter. Auf diesem Balkon stand Galvani, als er seinen Eisendraht anbrachte. Ehe er die Froschschenkel mit den Messinghaken am Eisendraht befestigte, hängte er sie an das Eisengitter des Balkons, um sie sofort zur Hand zu haben. Die Messinghaken waren am Rückgrat der Frösche befestigt, also an den Nerven. Und nun zeigte sich die zweite überraschende Wirkung: *Sooft ein Schenkel das Eisengitter berührte, zogen sich die Muskeln zusammen*, so wie Galvani das vorher schon auf dem Tisch im Arbeitszimmer beobachtet hatte. Die gleiche Erscheinung – aber jetzt unter anderen Bedingungen; keine Elektrisiermaschine war in Betrieb, kein Gewitter weit und breit, also kein elektrischer Einfluß von außen.

Diese Beobachtung, so sagt sich Galvani, hängt sicherlich mit den früheren Versuchen zusammen; aber sie zeigte zugleich etwas Neues. Er beobachtete weiter, saß viele Tage stundenlang vor Froschschenkeln am Balkongitter und wartete auf die Bewegung der Muskeln. Sie zeigte sich aber nur selten und ganz unregelmäßig. (Sie zuckten immer, wenn der Wind die Froschschenkel an das Eisengitter schlagen ließ und dadurch den „Stromkreis“ Messing – Froschschenkel – Eisen bildete!) Galvani fand den Grund nicht und wurde schließlich ärgerlich; er drückte endlich, um noch ein Letztes zu versuchen, die Froschschenkel an das Eisengitter. Da zuckten die Schenkel plötzlich häufig und stark! Den Gedanken, die Luftelektrizität sei daran schuld, schob Galvani bald beiseite, denn er hatte ja selber die

Zuckungen ausgelöst. Die Beobachtung ergab statt dessen eindeutig, daß die Schenkel zwischen zwei verschiedenen miteinander verbundenen Metallen liegen mußten, wenn die Zuckungen eintreten sollten.

Galvani hatte damit die Urform des *Galvanischen Elements* entdeckt und den *ersten fließenden elektrischen Strom* erzeugt. Das eigenartige dabei war, daß der Froschschenkel nicht nur Bestandteil dieses stromerzeugenden „Elements“ war, sondern den elektrischen Strom durch die Zuckungen zugleich anzeigte. Beides mußte zusammentreffen, damit Galvani seine Entdeckung machen konnte.

Der Entdecker kannte jetzt nur noch eine Aufgabe, weitere Beobachtungen zu machen, die wirkende Kraft und ihr Gesetz zu finden. Er übertrug folgerichtig die Erkenntnis des „Balkonversuches“ auf eine Versuchsanordnung in seinem Arbeitszimmer. Er legte die Froschschenkel auf eine Eisenplatte (an Stelle des Eisengitters) und berührte mit dem einen Ende des Messinghakens die Platte und mit dem anderen die Froschnerven. Wieder waren die Zuckungen da.

Nun folgten viele systematische Experimente mit verschiedenen Werkstoffen, mit Metallen und Nichtleitern; es blieb bei der Beobachtung, daß zwei verschiedene, miteinander verbundene Metalle Nerv und Fuß (oder Schenkelmuskel) berühren mußten, um Zuckungen hervorzurufen. Dabei war die Stärke der Bewegung abhängig von der Art der Metalle. Nichtleiter ließen keine Bewegung auftreten. Schließlich legte Galvani eine Silberplatte auf seinen Experimentiertisch und verband seinen Messingdraht mit Platte und Froschnerv. Dabei hielt er einen Schenkel mit den Fingern so hoch, daß der andere mit dem Fuß gerade die Silberplatte berührte. Sofort zogen sich die Muskeln zusammen, und der Kontakt zur Platte wurde unterbrochen. Dadurch entspannten sich die Muskeln wieder; der Fuß berührte erneut die Platte – und das Spiel begann von neuem. (Wir werden dabei an unsere elektrische Hausklingel erinnert.)



*Galvani erzeugt
den ersten
elektrischen Strom*

Volta's Säulen liefern den ersten elektrischen Strom

Galvani hatte seine große Entdeckung gemacht; er konnte sie jedoch nicht richtig erklären und zum wirkungsvollen Anstoß für eine technische Entwicklung werden lassen. Das ist seinem Landsmann, dem schon erwähnten Physiker Alessandro Volta (1745 bis 1827), vorbehalten geblieben. Dieses Erklären geht freilich noch nicht bis zu den Elektronen; zu Volta's Zeit war man noch von der Unteilbarkeit des Atoms überzeugt.

Volta untersuchte die tierischen elektrischen Organe und verglich sie mit der zweiten Versuchsreihe von Galvani. Frösche hatten keine Spannungserzeuger im Leibe – sollte das „elektrische“ Zucken der Froschschenkel durch die verschiedenen Metalle hervorgerufen worden sein? Volta wußte, daß ein elektrischer Schlag ein Lebewesen auf dem Wege über die Nerven töten kann und daß geringere Entladungen bestimmte Nerven erregen. In

diesem Sinne war der Froschschenkel ein Anzeigege­rät für den elektrischen Strom – und sogar ein viel empfindlicheres als die damals bekannten Elektroskope und Elektrometer.

Volta setzte sich nun selber an die Stelle des Frosches, allerdings auf eine viel angenehmere Art, als Galvani sie dem Frosch zugemutet hatte: Er legte ein Stück Metall an den oberen Teil eines Auges und nahm ein anderes Metall, das mit dem ersten leitend verbunden war, in den Mund. Der Erfolg war „ein heller Schein vor den Augen“; Volta erklärte ihn richtig als Reizung der Sehnerven.

Volta machte einen weiteren Versuch: Er legte auf die Mitte seiner Zunge eine Silber- oder Goldmünze, die durch einen feinen Draht mit einem Stück Stanniol (ausgewalztem Zinn) verbunden war. Wenn er mit dem Stanniol die Zungenspitze berührte, empfand er einen „säuerlichen oder erdigen“ Geschmack im Munde, und dieser Geschmack war dauernd da, solange die Metalle im Munde waren. Das war offenbar keine plötzliche, kurze Entladung, sondern ein Dauervorgang. Volta stellte auch die Metalle fest, die sich am besten für den Versuch eignen: Blei oder Zinn einerseits; Gold, Silber, Messing (Kupfer und Zink!) oder Eisen andererseits. Zwei *verschiedene* Metalle mußten es jedenfalls sein, dazwischen etwas Feuchtes, Leitendes – ganz gleich, ob Froschschenkel, menschliche Zunge oder etwas anderes. Das war die grundlegend neue Erkenntnis: Nicht aus dem tierischen Teil zwischen den Metallen kam die Elektrizität, sondern sie entstand offenbar aus dem Zusammenwirken aller drei Teile, und das Zucken der Froschschenkel zeigte – ebenso wie der Geschmack – den elektrischen Strom nur an.

Wir wissen, daß der Versuch im Mittelpunkt der naturwissenschaftlichen Forschung steht, und wollen daher endlich auch wieder selber experimentieren.

Der Voltasche physiologische Versuch

Unsere Augen wollen wir lieber schonen; aber die Geschmacksnerven dürfen wir zum Versuch benutzen. Eine Silber- oder gar Goldmünze (reines Metall!) werden wir kaum beschaffen können. Wir verbinden statt dessen einen schmalen Streifen Kupfer mit einem Stück Stanniol („Silberpapier“). Das freie Ende drücken wir leicht auf die Mitte unserer Zunge; gleichzeitig halten wir das Stanniolstück an die Zungenspitze. Wir spüren einen säuerlichen Geschmack, der auf den entstandenen elektrischen Strom zurückzuführen ist. Besitzer von goldenen oder silbernen Zahnplomben haben es noch leichter: Sie brauchen nur ein Stückchen Stanniol in den Mund zu nehmen, um den elektrischen Strom zu spüren. Manchmal tun sie es unabsichtlich: wenn sie beim Essen von Schokolade oder Weichkäse versehentlich ein Stückchen der Stanniolumhüllung in den Mund bekommen. Sie merken das Metallstückchen erst durch die physiologische Wirkung des winzigen elektrischen Stroms auf die Geschmacksnerven!



Das stromerzeugende Element wird hierbei also im Mund aus den zwei Metallen und dem Speichel gebildet, und der entstandene Strom reizt sofort die Geschmacksnerven. Eine ähnliche Wirkung erreicht man, wenn man auf die unangebrachte (weil gesundheitsschädigende) Art eine Taschenlampenbatterie dadurch auf Spannung prüft, daß man beide Kontaktstreifen an die Zunge legt. Man spürt dann eine Spannung in der angegebenen Weise; aber die Spannung beziehungsweise der elektrische Strom sind nicht im Munde, sondern außerhalb davon in der Batterie erzeugt worden. (Man prüft im übrigen eine Batterie am besten mit einem elektrischen Spannungsmesser, im Notfall mit einer passenden Glühlampe.)

Volta baut sein Element

Volta wußte nun: Aus drei ganz unverdächtigen, unelektrischen Dingen – zwei verschiedenen Metallen und einer dazwischenliegenden Flüssigkeit – kann man ein Element zusammenbauen, das „primär“, das heißt, ohne erst geladen zu werden, einen elektrischen Dauerstrom liefert. Das war ein großer Fortschritt gegenüber den bisher bekannten statischen Ladungen der Leidener Flaschen. Solche Elemente nannte man sehr bald *Primärelemente*.

Volta unterschied auch positive und negative Elektrizität an seiner Anordnung und stellte die Metalle in der Reihenfolge zusammen, in der sie die meiste Elektrizität lieferten (wir sagen „die größte Spannung“ und nennen die Reihenfolge die „Spannungsreihe“). Volta kannte den Begriff der Spannung noch nicht, aber er arbeitete mit ihr. Mit Recht hat man daher die Maßeinheit der elektrischen Spannung, das Volt (V), nach ihm benannt. Voltas *Spannungsreihe* sah so aus:

Zink, Zinn, Blei, Eisen, Kupfer, Platin, Gold, Silber.

Diese Stoffe, meist Metalle, nannte Volta „Leiter 1. Klasse.“ Die leitenden Flüssigkeiten konnte er nicht in die Gesetzmäßigkeit seiner Spannungsreihe einfügen; er nannte sie „Leiter 2. Klasse“. Sein Element, seinen Kreisstrom, erhielt er demnach, indem er immer einen Leiter 2. Klasse zwischen zwei Leiter 1. Klasse legte.

Volta gab sich mit dem, was er erreicht hatte, nicht zufrieden. Er wollte stärkere Stromquellen haben. Deshalb stellte er eine Reihe seiner Becher-Elemente nebeneinander auf: Silber – Flüssigkeit – Zink, Silber – Flüssigkeit – Zink usw.

Volta hatte damit das Gesetz gefunden, daß man die Spannung erhöht (summiert), indem man die Elemente in Reihe (hintereinander) schaltet. Damit hat er eine wesentliche Vorarbeit zur Entdeckung des Ohmschen Gesetzes geleistet.

Der Erfolg war schnell da: Volta schaltete in seinem „Becherapparat“, wie er seine Batterie nannte, bis zu 60 Elemente in Reihe und tauchte in die

beiden äußeren Becher je einen Zeigefinger. Das gab gleichzeitig einen elektrischen und einen freudigen Schlag!

Diese Becherreihe gefiel Volta jedoch auf die Dauer nicht, weil sie zu umständlich aufzubauen war und zuviel Platz beanspruchte. Als eines Tages ein Glas mit Lauge umgefallen und die Lauge auf seinen Anzug geflossen war – sehr zum Nachteil des Anzuges –, da kam Volta auf einen guten Gedanken: Wie wäre es, wenn man die Flüssigkeit in einem Pappstückchen unterbrächte, die Pappe also damit tränkte und dann in der bekannten Reihenfolge Silber – feuchte Pappe – Zink – Silber – feuchte Pappe – Zink usw. einfach aufeinanderlegte? Die Scheiben müßten alle gleich groß sein, damit alle Flächen ausgenutzt würden. Damit wäre auch der Anzug nicht mehr so gefährdet.

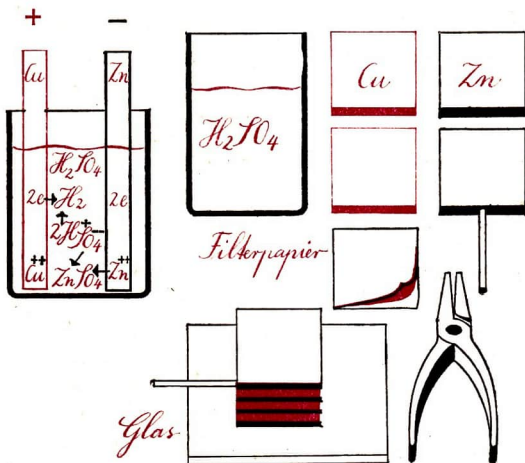
Eine unangenehme Eigenschaft hatten die elektrischen Säulen: Sie trockneten in ein bis zwei Tagen aus und lieferten dann kaum noch Strom (Volta sprach nun schon vom „elektrischen Strom“!). Der Physiker tauchte dann kurzerhand seine Säulen in Wasser und trocknete sie anschließend außen ab. Da nur das reine Wasser verdunstete und das neue in die Pappscheiben eindrang, war die Säule wieder betriebsfähig. (Das war nicht etwa ein „Aufladen“, sondern eine der Voraussetzungen für das Entstehen des Primärstroms wurde wiederhergestellt!)

Volta fand bald einen besseren Ausweg: Er umgab die frische Säule sorgfältig mit Wachs oder Pech. Das war zwar nicht ganz einfach und erforderte viel Geduld; aber nun lieferte die Säule auch wochenlang Strom – so lange, bis die „Gegenspannung“ (Polarisationsspannung, die entgegengesetzt wirkt) in den Elementen zu groß wurde; aber von dieser unerfreulichen Nebenerscheinung ahnte Volta noch nichts. In den später erfundenen Zink-Kohle-Elementen wird die Gegenspannung, die durch Wasserstoffbildung entsteht, mit Hilfe von Braunstein, der den Wasserstoff aufnimmt, beseitigt.

Wir bauen eine Säule nach Volta

Nötig sind dazu möglichst dickes Zinkblech, Kupferblech, Leinen oder Filterpapier (Löschpapier), ein Glühlämpchen 2,5 oder 3 V, 0,2 A, mit Fassung (aus einer Taschenlampe), eine Tiegelszange oder große Pinzette, einige Kupferdrähte und Anschlußklemmen (etwa Krokodilklemmen) für die Verbindungen, einige Glasplatten, 5 Bechergläser mit mindestens 5 cm Durchmesser, konzentrierte Kochsalzlösung (NaCl), konzentrierte Salmiaklösung (NH_4Cl), 1:10 verdünnte Schwefelsäure (H_2SO_4). Ganz ausgepichte Experimentatoren verwenden noch einen Spannungsmesser mit einem Meßbereich 5 oder 10 V und einen Strommesser mit dem Meßbereich 1 A. Beim Aufstellen der Versuche ist ein Drehspulmeßgerät (Multizet) mit einem Spulenwiderstand von 100 Ohm benutzt worden.

Aus den Blechen schneiden wir je fünf Platten von 4 cm mal 4 cm Größe. Wollen wir die Bleche in den Bechergläsern miteinander verbinden, ohne Drähte zu benutzen, so schneiden wir noch die Kontaktstreifen mit aus.



Das Volta-Element

Ebensogut können wir die Bleche mit Drähten und Klemmen miteinander verbinden; die Streifen stören dann nicht. Wollen wir sehr gründlich vorgehen und die Leistungen von Becherbatterie und Säule miteinander vergleichen, dann schneiden wir Bleche mit und ohne Kontaktstreifen aus. Die Platten müssen blank sein, um guten Kontakt zu geben.

Aus dem Stoff beziehungsweise aus dem Papier schneiden wir 20 Stücke, jedoch etwas kleiner, etwa 3,8 cm Seitenlänge; sie werden kurz vor dem Einsetzen durch Eintauchen in den jeweiligen „Elektrolyten“ (hier konzentrierte Salmiaklösung) getränkt und ein wenig ausgedrückt, damit unter dem leichten Druck der Platten der Voltaschen Säule keine Flüssigkeit mehr heraustropft. Wir arbeiten am saubersten mit der Tiegelzange oder Pinzette und mit kleinen Glasplatten. Bei der Benutzung verdünnter Schwefelsäure müssen wir uns sorgfältig vor Spritzern auf Haut und Kleidung hüten; ist es doch geschehen, so müssen wir die betreffenden Stellen sofort mit viel Leitungswasser spülen, denn die Säure ätzt stark!

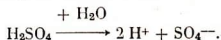
Nun verbinden wir unser Glühlämpchen mit der freien Zinkplatte und der freien Kupferplatte. Das Glühlämpchen leuchtet ziemlich hell auf. Im Laufe von etwa 2 Minuten geht die Helligkeit zurück; dann erlischt das Lämpchen. Wie ist das zu erklären?

Die Kupferplatte Cu und die Zinkplatte Zn stehen im Elektrolyten, der verdünnten Schwefelsäure H_2SO_4 (jedes Molekül mit zwei Atomen Wasser-



stoff, H, einem Atom Schwefel, S, und vier Atomen Sauerstoff, O). Da die Schwefelsäure mit Wasser verdünnt ist, zerfallen die Schwefelsäuremoleküle je nach der Verdünnung zum mehr oder weniger großen Teil (man nennt das „Dissoziation“). Dabei entstehen drei Teile, 2H^+ und SO_4^{--} . Alle Elektronen, das heißt die ganze elektrische Ladung des Moleküls, bleiben auf dem Säurerest SO_4^{--} , und der wird durch den Elektronenüberschuß negativ.

Elektronenmangel dagegen bedeutet positive Ladung. Die haben nun die beiden Wasserstoffatome, und wir schreiben:



Aus der Chemie wissen wir: Eine Säure ist eine chemische Verbindung mit Wasserstoff, der durch ein Metall ersetzt werden kann; dabei entsteht ein Salz der Säure. In unserem Element bewegt sich das SO_4^{--} zum Zink, das dafür aufnahmebereiter als Kupfer ist. Es verbindet sich mit einem Zinkmolekül und läßt auf der Platte seine elektrische Ladung, also die beiden Elektronen, zurück, weil das Salz Zinksulfat (ZnSO_4) elektrisch neutral ist. Daher ist das Zink in allen Galvanischen Elementen der negative Pol. Eine peinliche Nebenwirkung ist dabei, daß die Zinkplatte regelrecht aufgefressen wird.

Wie sieht es inzwischen auf der anderen Seite, an der Kupferplatte, aus? Hierhin bewegten sich die zwei Wasserstoffreste 2H^+ . Sie wollen richtige, existenzfähige Moleküle werden. Die beiden Wasserstoffreste können sich aber nicht zum Molekül vereinigen, weil die Elektronen fehlen und die positiven Ladungen abstoßend wirken.

Die 2H^+ entreißen dem Kupfer die benötigten Elektronen und werden zu einem neutralen Wasserstoffmolekül H_2 . Die Kupferplatte hat damit zu wenig Elektronen und wird elektrisch positiv. Verbinden wir die Pole des Elements außen durch einen Draht miteinander — etwa über ein Glühlämpchen wie in unserem Versuch —, so ist der Stromkreis geschlossen; ein Strom fließt, und das Lämpchen leuchtet auf. Die überzähligen Elektronen fließen von der Zinkplatte über Draht und Glühlämpchen auf die Kupferplatte, wo sie leere Plätze vorfinden.

Nun haben wir bei unserem Versuch nicht nur eine Freude, sondern auch eine kleine Enttäuschung erlebt: Das Lämpchen glühte nur kurze Zeit und war daher als Nachtbeleuchtung keineswegs geeignet. Wie das kommt, ist schnell berichtet:

Das entstandene H_2 -Molekül bildet mit vielen seinesgleichen schließlich winzige Bläschen von Wasserstoffgas. Diese Bläschen bleiben nun leider an der Kupferplatte haften und versperren den nachkommenden Wasserstoffresten den Weg. Die Wanderung der elektrischen Ladungen auf dem Rücken der Atome hört auf; unser Element liefert keinen Strom mehr.

Daher ist das Glühlämpchen so bald erloschen! Um erneut Spannung und Strom zu bekommen, braucht man nur den Stromkreis zu unterbrechen, die Kupferplatte aus der Säure herauszuheben, mit einem Holzspan abzuwischen und wieder einzutauchen. Nach Einschalten leuchtet das Lämp-

chen wieder, bis sich an Stelle der abgestreiften Gasbläschen genügend neue gebildet haben.

Das ist ein sehr umständliches Verfahren, und man bemüht sich daher mit Erfolg, hier die Natur mit ihren eigenen Gesetzen zu überlisten. Einer von mehreren Wegen besteht, wie schon angedeutet, darin, daß man den positiven Pol mit Braunstein (Mangandioxid, MnO_2) umgibt. Dieser Braunstein gibt leicht Sauerstoff ab; der verbindet sich sofort mit dem Wasserstoff zu unschädlichem Wasser (H_2O).

Der elektrische Strom zeigt, was er kann

Die Voltasche Batterie war also da und mit ihr eine recht beachtliche elektrische Spannung und ein entsprechender Strom. Aber was sollte man damit anfangen? Vor allem: Wie konnte man ihn auf einfache Art nachweisen? Man hatte doch nicht immer Froschschenkel zur Verfügung, und außerdem war das Verfahren mit den zuckenden Schenkeln umständlich und ungenau. Den menschlichen Körper zum Nachweis zu benutzen war ungesund, ja schließlich lebensgefährlich. Die physiologischen Wirkungen des elektrischen Stroms kamen daher als Nachweis sehr bald nicht mehr in Betracht.

Die Wärmewirkung hatte Volta gespürt, als er das erstmal eine große Becherbatterie mit einem dünnen Draht kurzschloß. Danach war es eine Zeitlang üblich, auf diese Weise den Stromfluß mit einem dünnen Platindraht nachzuweisen – bis bessere Verfahren entdeckt wurden.

Diese Fragen nach den Eigenschaften und dem Nachweis des elektrischen Stroms beschäftigten nicht nur Volta, sondern viele kluge Köpfe seiner Zeit. Sicher war, daß Eigenschaften des Stroms und sein Nachweis miteinander zusammenhingen. Das gleiche (positive oder negative) Elektrizitäten einander abstoßen, war lange bekannt, auch die Erscheinung der Influenz, die darauf beruht. Mit Hilfe dieser Erkenntnis baute man die Elektroskope, von denen wir mehrere Bauarten kennen. Diese Elektroskope sprachen auf die statischen Ladungen von Reibungselektrieremaschinen mit ihren Hunderten und Tausenden Volt Spannung wunderschön an; bei den vergleichsweise niedrigen Spannungen der Voltaschen „Kontaktspannung“ taten sie das nicht oder zuwenig.

Ein neuer Schritt

Dr. Asch in Oxford entdeckte es im Jahre 1795: Der galvanische Strom zersetzt Wasser! Endlich hatte man eine Eigenschaft des Stroms gefunden, die erste der drei grundlegenden: die *chemische Wirkung*.

Dr. Asch füllte ein Glasgefäß mit gewöhnlichem (salzhaltigem, also elektrisch leitendem) Wasser und steckte eine Zinkplatte und eine Silberplatte hinein. Das Zink verband er mit dem positiven Pol der Voltaschen Säule, das heißt mit dem Silber; das Silber im Glasbecher verband er mit dem Zink der Stromquelle.

Ganz deutlich war es zu beobachten: Das blanke Zink wurde grau, an der Silberplatte stiegen Gasblasen auf. Diese erste Beobachtung genügte zur Erklärung noch nicht. Asch erkannte die graue Schicht über dem Zink als Zinkoxid. Dann fing er die Gasbläschen im wassergefüllten, mit der Öffnung nach unten gehaltenen Probierring auf, untersuchte sie und fand, daß er Wasserstoff vor sich hatte. Das Gas brannte und bildete dabei Wasser! Alexander v. Humboldt hat den Versuch mit gleichem Erfolg wiederholt. Man wußte, daß Wasser aus Sauerstoff und Wasserstoff besteht. Priestley hatte 1774 den Sauerstoff durch Erhitzen von Quecksilberoxid dargestellt. Der Wasserstoff war schon Paracelsus im 16. Jahrhundert bekannt, aber erst 1766 zeigte Cavendish, wie man ihn von anderen brennbaren Gasen unterscheidet, und lehrte 1781, daß Wasserstoff zu Wasser verbrennt. Daraus und aus den Entdeckungen Lavoisiers über den Luftsauerstoff (1777) ging hervor, daß Wasser eine chemische Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff ist.

Einen Forscher müssen wir in diesem Zusammenhang noch nennen: Johann W. Ritter in Jena. Er machte 1800 mit einer Volta-Säule von 64 Elementen die gleichen Versuche, fing aber Sauerstoff und Wasserstoff einzeln auf, mischte sie dann miteinander und ließ sie verpuffen. Er bewies dann, daß dabei dasselbe Wasser wieder entstand, das er vorher zersetzt hatte. Das war wieder ein Fortschritt; aber Ritter entdeckte noch etwas sehr Wichtiges, das später eine ganze, besondere Technik auslösen sollte:

Er führte einen Strom durch eine Kupfersulfatlösung und fand, daß sich die Lösung zersetzte und daß sich Kupfer an der einen Zuleitungsplatte niederschlug; die Platte wurde verкупfert.

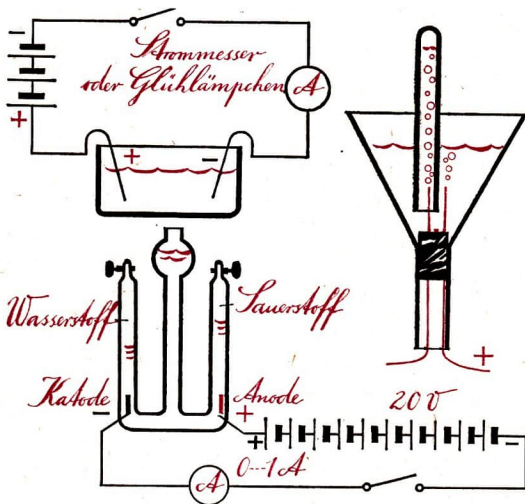
Mit all diesen Versuchen der Forscher waren nicht nur die grundlegenden Erkenntnisse zur *Elektrolyse* geschaffen, sondern auch die Impulse für die Entwicklung der Elektrochemie und einer großen chemischen Industrie gegeben worden. Das ist das eine wichtige Ergebnis der Voltaschen Versuche. Das andere ist das elektrische Spannungsgesetz: Zink, Zinn, Blei, Eisen, Kupfer, Platin, Gold und Silber bilden eine Spannungsreihe. Jedes Metall dieser Reihe wird in Berührung mit einem der folgenden über eine leitende Flüssigkeit negativ, mit einem der vorhergehenden positiv elektrisch. Je weiter die Metalle in der Reihe auseinanderstehen, desto größer ist die Spannungsdifferenz. Durch wiederholte Verbindung zweier Metalle der Spannungsreihe läßt sich die Spannung vergrößern (Voltasche Säule).

Galvanis Arbeiten waren eine Voraussetzung zu Voltas Erfolgen; das wußten beide, und sie schätzten einander sehr. Ritter hat die Voltasche Spannungsreihe noch erweitert und auch die Bezeichnung „Pole“ eingeführt. Davy hat die Vorgänge in der Voltaschen Säule theoretisch untersucht. — Wir wollen jetzt die chemischen Wirkungen des elektrischen Stroms praktisch untersuchen.

Wir elektrolysieren

Wir legen sozusagen „einen Streifen Wasser“ in einen Stromkreis mit einer Taschenlampenbatterie, 4,5 V, oder einem Akkumulator, 4 bis 6 V, und einem Strommesser oder Glühlämpchen als Stromanzeiger. Das Wasser kommt in irgendein Glasgefäß; damit der Stromkreis geschlossen ist, tauchen die beiden Enden der Leitung – sie heißen jetzt Elektroden – in die Flüssigkeit. Zweckmäßig ist ein Trichter als Gefäß; man kann freilich auch ein Becherglas oder ein anderes Glasgefäß nehmen. Als Elektroden können im einfachsten (wenn auch nicht günstigsten) Fall die breitgeklopften Enden der Kupferzuleitungen genommen werden. Wesentlich besser ist Nickeldraht – und am besten Platindraht. Je weniger die Elektroden auf die entstehenden Gase reagieren, desto zuverlässiger werden die Messungen der entstehenden Gasmengen. Der Physiker benutzt daher Platinelektroden in seinem Wasserzersetzungsgesetz nach Hofmann. Für Versuche, bei denen kein Sauerstoff entwickelt wird oder aufgefangen werden soll, kann man auch Kohlestäbe (aus einer alten Taschenlampenbatterie) als Elektroden verwenden.

Wir zerlegen Wasser



Wir füllen nun destilliertes Wasser in unser Zersetzungsgefäß, so daß beide Elektroden im Wasser liegen, ohne einander zu berühren, und schließen den Stromkreis. Ergebnis: Kein Strom fließt. Destilliertes, das heißt chemisch reines Wasser leitet den Strom also nicht; es ist ein Isolator.

Wir werfen Kupferchlorid (CuCl_2), Zinkchlorid oder ein ähnliches Salz in das Wasser: Der Strommesser oder das Glühlämpchen zeigt einen Strom an. Folgerung: Die Lösung des Salzes leitet den elektrischen Strom. Aber wie kommt das?

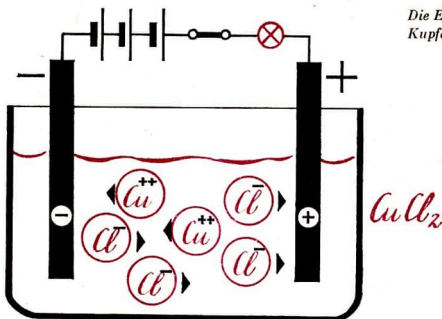
In Leitern erster Klasse, das heißt in Metallen, fließt der elektrische Strom, ohne den Leiter selbst zu verändern; er erwärmt ihn höchstens. In Leitern zweiter Klasse – das sind die *Elektrolyte*, Lösungen von Säuren, Basen und Salzen – verändert er dagegen den Leiter; er zersetzt ihn. Diese Zersetzung nennt man *elektrolytische Dissoziation* (Spaltung).

In den Leitern zweiter Klasse ist eine bestimmte Anzahl (nicht alle) der Moleküle des gelösten Stoffes in geladene Atome oder Atomgruppen aufgespalten. Ein Teil davon trägt eine positive, die anderen eine negative Ladung. Bei der Betrachtung der „inneren“ Vorgänge im Volta-Element lernten wir ähnliches kennen! Dort entstand nur eine Spannung (beziehungsweise ein Strom), während jetzt eine Spannung von außen angelegt wird und der damit zusammenhängende Strom diese Vorgänge auslöst. Im gewissen Sinne ist das eine Umkehrung der Lage.

Die Atome oder Atomgruppen sind also elektrisch geladen. Aus unserer Abbildung auf Seite 212 ergibt sich, daß die Elektroden ebenfalls geladen sind. Die positiv geladene heißt *Anode* (vom griechischen aná hodós = der Weg aufwärts), die negativ geladene *Katode* (von katá hodós = der Weg von oben, abwärts). Unsere alte Regel bewährt sich sofort: Entgegengesetzte Ladungen ziehen einander an; alle positiv geladenen Teile wandern zur Katode, alle negativ geladenen zur Anode. Und weil sie wandern müssen, nennt man sie die Wandernden – auf Griechisch: die *Ionen*.

Sie wandern, wie das Naturgesetz es befiehlt, werfen ihre Ladung an der Zielelektrode ab und werden wieder ganz gewöhnliche Atome oder Atomgruppen. Sie haben ihre Aufgabe erfüllt, haben die elektrische Ladung befördert – und damit den elektrischen Strom im Elektrolyten gebildet. Wir wollen uns noch die „Vornamen“ der beiden Ionen-Arten merken: Die zur Anode (dem Pluspol) wandernden heißen *Anionen* (negativ geladen), die zur Katode (dem Minuspol) wandernden heißen *Kationen* (positiv geladen). Ein Salz zerfällt (dissoziiert) stets in positiv geladene Metall-Ionen und in negativ geladene Säurerest-Ionen, eine Säure in positive Wasserstoff-(H⁺)-Ionen und negative Säurerest-Ionen, eine Base in positive Metall-Ionen und negative Hydroxyl-(OH⁻)-Ionen. „Basenrest“ sagt man nicht; der ist immer eine OH-Gruppe – einfach oder mehrfach. Elektrolyse nennt man diesen Vorgang, vom griechischen lyein = lösen. Die chemischen (genauer: elektrischen) Bindungen des Moleküls sind ja gelöst worden!

Die obenstehende Abbildung zeigt den (leider unsichtbaren) Vorgang bei unserem Versuch. An der Anode (+) sammeln sich die Chlor-Anionen, werden durch Entladung zu Chlor-Molekülen und steigen, zu Bläschen zusammengeballt, nach oben. Wir können den charakteristischen (giftigen! Vor-



sicht!) Chlorgeruch deutlich wahrnehmen, gefärbte angefeuchtete Papierstreifen und Blütenblätter bleichen.

Die Kupfer-Kationen sammeln sich an der negativ geladenen Katode und nehmen hier Elektronen auf, mit denen sie ihre (doppelte) positive Ladung ausgleichen; dadurch werden sie zu neutralen Kupfermolekülen und bleiben an der Katode haften.

Wir zersetzen Wasser

Wir wollen jetzt Wasser zersetzen. Dazu füllen wir unser Gefäß mit Leitungswasser, tun einige Tropfen Schwefelsäure hinein (die die Spaltung, die Dissoziation, einleiten und uns hier nicht weiter beschäftigen sollen) und bringen über den beiden Elektroden wassergefüllte Reagenzgläser an. Sobald wir unseren Gleichstrom hindurchschicken, steigt an der Katode viel Wasserstoff, an der Anode wenig Sauerstoff empor; die Gase sammeln sich in den Reagenzgläsern.

Wir können den Wasserstoff dem Reagenzglas entnehmen und abbrennen lassen. Wir verschließen die Öffnung des Glases mit dem Daumen, nähern das Glas einer Flamme und lassen den Wasserstoff ausströmen. Er verpufft. Wir wollen aber stets nur Gläser verwenden, in denen der Wasserstoff alle Luft mit ihrem Sauerstoff verdrängt hat! Beim Anzünden explodiert sonst das Gemisch, das unter dem Namen „Knallgas“ bekannt ist, und kann unser Glas sprengen.

Der Sauerstoff ist im Moment seines Freisetzens ein angriffslustiger Geselle; wenn er kann, verbindet er sich sofort mit dem Anodenmetall. Platin weist ihn ab; mit Platinelektroden können wir exakt feststellen, daß bei der Wasserzersetzung genau doppelt soviel Wasserstoff wie Sauerstoff entsteht. Bei anderem Elektrodenmaterial erhalten wir weniger Sauerstoff.



Wir galvanisieren

Die Anwendung unserer Erkenntnisse spielt in der Produktion eine sehr bedeutende Rolle: Mit Hilfe der Elektrolyse gewinnt man Metall in reiner Form, man überzieht Teile mit Metallüberzügen (Galvanisieren, beispielsweise Verkupfern, Verchromen, Versilbern, Vergolden), und man stellt negative Nachbildungen, „Matrizen“, her (Galvanoplastik, beispielsweise in der Drucktechnik zum Herstellen von Druckformen, Galvanos).

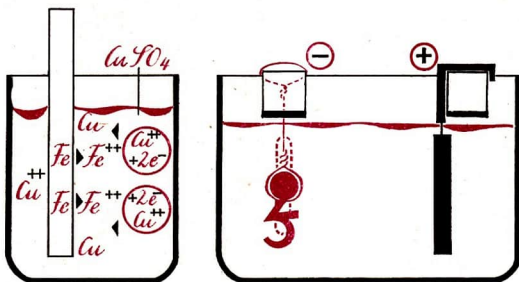
Wir arbeiten vorerst ohne Spannungsquelle

Wichtigste Voraussetzung bei allen Versuchen dieser Art ist größte Sauberkeit der zu galvanisierenden Teile – vor allem müssen sie fettfrei sein, sonst werden sie nicht benetzt. Trichloräthylen hilft, auch Abbürsten mit heißer Sodalösung (10prozentig). Daß Rost vorher abgeschmirgelt wird und daß man nach der Säuberung den Gegenstand nicht mehr mit den Fingern anfaßt, ist selbstverständlich. Wir wollen das in unserem Eifer nicht vergessen.

Wir lösen in einem Becherglas etwa 10 g Kupfersulfat (CuSO_4) in 500 ml destilliertem Wasser auf und säuern die Lösung mit 3 bis 5 ml verdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4) an. Taucht man in dieses Bad ein sauberes Eisenstück, etwa einen Schlüssel, so überzieht es sich in wenigen Sekunden mit einer rötlichen Kupferschicht. Wir nehmen das Stück schnell heraus und spülen es mit Leitungswasser ab.

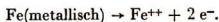
Auf diese Weise kann man in einem Bad aus einer Silbersalzlösung (etwa Silbernitrat, AgNO_3) Eisen oder Kupfer oder Messing versilbern. Wir wollen uns diesen Effekt erklären.

Unedle Metalle, wie Eisen, gehen leichter in Lösung als edle, beispielsweise Silber. Die unedlen haben, so sagt der Physiker, einen höheren *Lösungs-*

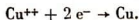


Wir galvanisieren

druck; dadurch können sie edlere aus deren Lösungen verdrängen. Lösungsdruck heißt, die Metallatome wollen Elektronen abgeben, sich dadurch positiv aufladen und positive Ionen (Kationen) werden. Als Gleichung sieht das so aus:



Das elementare Eisen geht in Lösung, gibt zwei Elektronen ab und wird zum Ion. Das Kupfer ist im Bad als Kupferion, ebenfalls positiv, gelöst und nimmt die vom Eisen abgegebenen Elektronen auf. Dadurch wird es entladen und wieder zum Molekül, zum elementaren Kupfer. Das geschieht unmittelbar am Eisen, daher der Überzug von Kupfer. Beim Kupfer sieht die Gleichung so aus:



Ob ein Metall edel oder unedel ist, hängt vom anderen Metall ab. Man hat eine Spannungsreihe aufgestellt: K Na Mg Al Mn Zn Cr Cd Fe Co Ni Sn Pb H (Wasserstoff benimmt sich chemisch hier wie ein Metall) Cu As Bi Sb Hg Ag Pt Au. Jedes Metall verdrängt die nachfolgenden aus ihren Salzlösungen.

Der „edle Charakter“ eines Metalls ist also relativ; er hängt davon ab, ob ein Metall in der Spannungsreihe vor oder hinter dem zweiten Metall steht. Wir können nur edlere Metalle für den Überzug aussuchen, und je weiter das Werkstückmetall und das aufzubringende (Überzug-)Metall in der Reihe voneinander entfernt sind, desto besser. Beispielsweise läßt sich Messing besonders gut auf die geschilderte Art versilbern, weil das Zink im Messing weit vom Silber entfernt ist, also einen erheblich größeren Lösungsdruck hat.

Wir galvanisieren mit Batterie

Wir wollen es grundsätzlich so machen, wie in der Industrie Metalloberflächen veredelt oder gegen Korrosion geschützt werden, und zwar wollen wir einen kleinen Metallgegenstand, vielleicht einen Schlüssel, verkupfern. Wir stellen eine Badlösung aus 500 ml destilliertem Wasser und 10 g Kupfersulfat in einem Glas her. Dann hängen wir an der einen Seite des Glases den zu verkupfernden Gegenstand (vorher sehr sauber und fettfrei gemacht) in das Bad und verbinden ihn mit dem (langen) Minuspol einer Taschenlampenbatterie von 4,5 V; es genügen auch zwei hintereinandergeschaltete Stabbatterien, sie geben zusammen 3 V. Der Gegenstand wird damit Katode.

Auf der anderen Seite taucht ein kleines sauberes Kupferblech in die Lösung; es wird mit dem Pluspol der Batterie verbunden. Der Strom soll nur gering sein, höchstens 0,1 A; der Zwischenraum zwischen den Elektroden darf daher nicht zu klein sein. Nach 10 Minuten können wir schon einen schwachen Niederschlag von Kupfer auf dem Schlüssel feststellen. Wir bürsten vorsichtig lose Kupferteilchen ab und verkupfern dann weiter – längstens eine Stunde.

Was ist geschehen? Die positiven Kupferionen sind unter dem Einfluß der Spannung zur negativen Katode, dem Schlüssel, gewandert und dort entladen (neutralisiert) worden. Der Säurerest SO_4 bildete mit dem Kupfer der Anode neues Kupfervitriol (CuSO_4). Das ist wichtig, denn das Verhältnis zwischen dissoziierten und nichtdissoziierten Molekülen, der Dissoziationsgrad, muß erhalten bleiben. Er hängt unter anderem von der Art der Lösung und von ihrer Temperatur ab.

Wir bauen den einfachsten Akkumulator der Welt

Akkumulator kommt vom lateinischen *accumulāre* = ansammeln. Das Gerät sammelt, speichert elektrische Ladungen und kann sie beliebig wieder abgeben (gute Akkumulatoren haben einen Wirkungsgrad von etwa 80 %). Man spricht daher auch von „Sammlern“ und, wenn sie Bleiplatten haben, von „Bleisammlern“.

Unser Sammler ist wirklich der einfachste; er besteht aus zwei sauberen Bleiplatten (beispielsweise je 4 cm mal 10 cm groß), die in einem Glasgefäß mit 1 : 10 verdünnter Schwefelsäure (Vorsicht! Ätzt!) stehen. Die Platten können sehr dünn sein. Am einfachsten läßt man beim Ausschneiden der Platte oben einen Streifen dran, der – umgebogen – über den Glasrand gehängt wird und so die Platte hält.

Nun legen wir eine Spannung von 4 V an die Platten. In der Abbildung auf Seite 216 ist ein „richtiger“ zweizelliger Blei-Akkumulator mit einem Vorschaltwiderstand von etwa 4 Ohm (damit der Strom nicht zu stark wird) benutzt worden. Wir können an seiner Stelle auch zwei parallelgeschaltete (+ mit + und – mit –) Taschenlampenbatterien von 4,5 V ohne Widerstand verwenden.

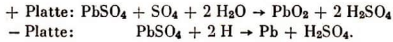
Die linke Schaltung auf Seite 216 zeigt, wie unser „Akku“ geladen wird. Die mit dem Pluspol der Ladespannungsquelle verbundene Bleiplatte färbt sich in wenigen Minuten braun, die andere wird bleigrau. Die während des Ladens auftretende Spannung beträgt 2,1 bis 2,3 V; es ist eine Polarisationsspannung.

Entfernen wir die Ladespannungsquelle nach etwa 5 Minuten und legen an ihrer Stelle ein 2-V-Glühlämpchen an unsere Platten, so leuchtet es hell auf; ein Spannungsmesser zeigt genau 2 V an. Das Lämpchen wird dann allmählich dunkler, und die Platten nehmen nach einiger Zeit wieder die Farbe an, die sie vor der Ladung hatten. Wir haben unseren Akkumulator entladen.

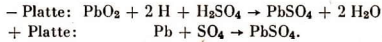
Folgendes ist geschehen: Sobald die Bleiplatten in die Schwefelsäure gestellt werden, bildet sich auf den Plattenoberflächen eine dünne Schicht Bleisulfat (PbSO_4). Die Schwefelsäure (H_2SO_4) ist als Elektrolyt in positive Wasserstoff-Ionen (H^+) und negative SO_4 -Ionen (SO_4^-) teilweise zerfallen. Die H^+ -Ionen wandern zur negativen Bleiplatte (der Katode) und reduzieren dort das Bleisulfat (unter Bildung von Schwefelsäure) zu metallischem Blei (Pb). Die SO_4^- -Ionen wandern zur positiven Bleiplatte (Anode) und



verbinden sich mit dem Wasserstoff vom Wasser zu Schwefelsäure. Die chemischen Gleichungen lauten:

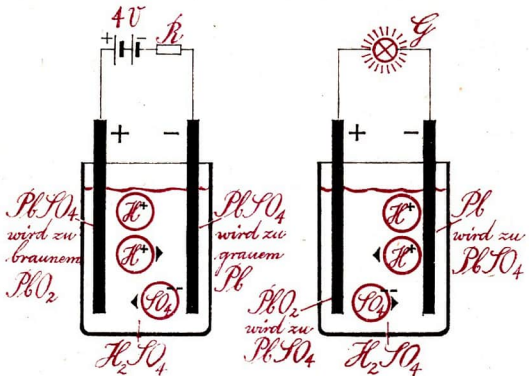


Beim Entladen bildet sich an beiden Platten wieder Bleisulfat nach den Gleichungen:



Die Ladefähigkeit (Aufnahmefähigkeit) eines Akkumulators wird in Amperestunden (Ah) gemessen. Die Ladefähigkeit ist das Produkt aus Entladestrom in A und Entladedauer in Stunden (h). Man bezeichnet die Akkumulatoren auch als *galvanische Sekundärelemente*, weil sie erst nach dem Aufladen ein Galvanisches Element darstellen; Primärelemente, beispielsweise Kupfer-Zink-Elemente, liefern durch die elektrochemischen Umsetzungen ohne Aufladen unmittelbar (primär) Spannung und Strom. Die „NiFe“-Akkumulatoren enthalten Nickel- und Stahlplatten in verdünnter Kalilauge (KOH, 21prozentig). Sie sind mechanisch und elektrisch unempfindlicher sowie leichter als Bleiakkumulatoren, haben aber eine Spannung von nur 1,25 V je Zelle und einen Wirkungsgrad von nur etwa 50 %.

Beim Laden des Akkumulators finden also chemische Umsetzungen statt, die den Akkumulator zu einem galvanischen Element machen. Beim Entladen verlaufen diese chemischen Prozesse rückwärts, so daß die Elektroden wieder in den ursprünglichen Zustand gebracht werden.



Der Blei-Akkumulator

Die Akkumulatoren werden vor allem für folgende Zwecke benutzt: als Pufferbatterien (Ausgleichbatterien), das heißt zur Konstanthaltung von Spannung und Stromstärke in Gleichstrom-Kraftanlagen, als Spannungsquelle für Fernmeldenetze, in Laboratorien, Elektrofahrzeugen, Kraftwagen und tragbaren Lampen sowie in Koffergeräten verschiedener Art.

Der Strom erwärmt seinen Leiter

Die Elektronen müssen bei ihrem Weg durch den Leiter einige Widerstände überwinden; dadurch entsteht eine Reibungswärme. Erwärmen wir von außen her den Leiter, so verstärkt sich die Reibung und damit der *elektrische Widerstand* des Leiters.

Wir erhöhen den Leiterwiderstand

Wir schalten in den Stromkreis aus Batterie und Glühlampe eine kleine Wendel aus dünnem Eisendraht (etwa 0,3 mm Durchmesser). Dieses Drahtstück soll so viel Widerstand haben, daß das Glühlämpchen noch hell brennt. Erhitzen wir die Wendel mit einem Bunsenbrenner oder einer Kerze, so leuchtet die Glühlampe schwächer.

Wer einen Strommesser besitzt, kann die Vergrößerung des Widerstandes und den damit verbundenen Rückgang der Stromstärke noch besser nachweisen; er kann den Zuwachs an Widerstand sogar (nach dem Ohmschen Gesetz) dadurch berechnen, daß er die Spannung durch den Unterschied in der Stromstärke teilt.

Wir weisen die Erwärmung des Leiters nach

Alle Metalle (und andere Stoffe) dehnen sich bei Erwärmung aus. Wir bauen einen dünnen Leiter, am besten einen Widerstandsdraht (Manganin, Nickelein oder einen anderen) nach der umstehenden Abbildung auf – mit einem kleinen Wägestück in der Mitte. Wir beobachten, daß sich das Wägestück senkt, sobald wir den Leiter an unsere Stromquelle legen. Die Wärmeentwicklung hat sofort eingesetzt; sie steigt (theoretisch) mit dem Quadrat der Stromstärke.

Diese kennzeichnende Begleiterscheinung des elektrischen Stroms, Wärme zu erzeugen, wird in der Technik und im Haushalt ebenfalls ausgenutzt: in Schmelzöfen der Metallurgie, in Heiz- und Kochgeräten, Bügeleisen, Kühlschränken, Lötkolben, medizinischen Geräten und anderem mehr – und schließlich in den Glühlampen. Hier will man freilich die Lichtwirkung und nicht die Wärme; leider ist die Wärme noch mehr oder weniger Voraussetzung und Nebenerscheinung bei der Lichterzeugung. Wärme bedeutet hier Verlust!

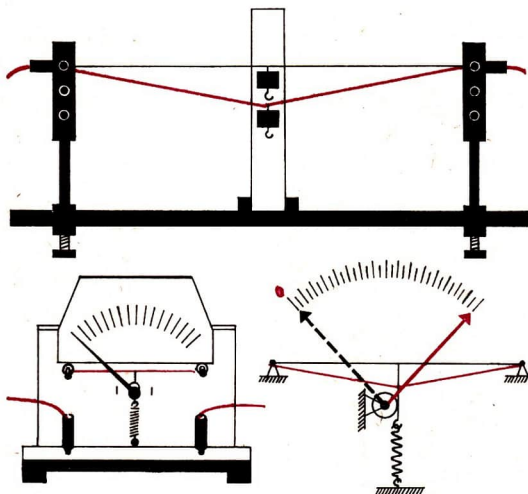
Man nutzt die Wärmewirkung auch in elektrischen Meßgeräten, den *Hitzdraht-Meßgeräten*, aus. Sie sind für Messungen von Gleichstrom und Wech-

selbststrom (auch hoher Frequenzen) geeignet. Dadurch, daß die Wärme annähernd mit dem Quadrat der Stromstärke steigt, bekommt jedes Hitzdrahtmeßgerät einen „quadratischen Charakter“ mit entsprechender (nichtlinearer) Skale. Da wir für unser Labor sowieso Meßgeräte brauchen, wollen wir uns ein Hitzdrahtgerät bauen.

Wir bauen ein einfaches Hitzdraht-Meßgerät

Dazu sind nötig: 1 Grundbrett 25 cm mal 10 cm; 1 Rückwand, etwa 20 cm hoch; 2 Anschlußbuchsen; 1 Wendelfeder (etwa 3 cm lang); je 25 cm Kupferdraht 0,2 mm Durchmesser, Stahldraht 0,2 mm Durchmesser, Widerstandsdraht 0,2 bis 0,4 mm Durchmesser; 1 Rolle mit etwa 10 cm langem Zeiger; 1 Achsstift für die Rolle; 2 Klemmen für den Hitzdraht; 1 Skale aus starkem Papier oder Pappe; etwa 20 cm Schnur mit 2 kleinen Haken; 1 Haken; isolierter Verbindungsdraht, Kupfer, möglichst großer Durchmesser.

Die Rückwand wird am Grundbrett befestigt. An der oberen Kante wird die Skale angebracht. Unterhalb der Skale wird links und rechts mit mög-



Das Hitzdraht-Meßgerät

lichst großem Abstand voneinander (etwa 20 cm) je eine Klemme für den Hitzdraht befestigt.

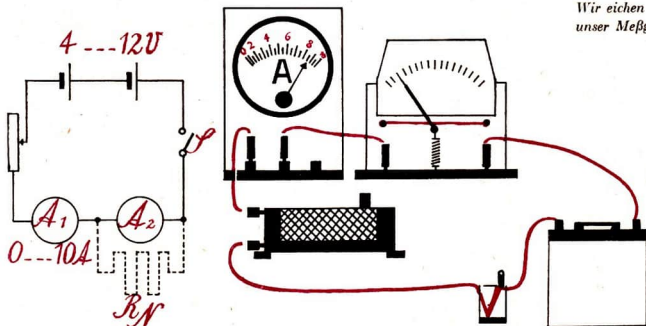
Der Achsstift für die Zeigerrolle wird in mittlerer Höhe zwischen Grundbrett und Hitzdraht, um den Rollenhaltmesser nach links versetzt, in das Grundbrett eingelassen. Dicht über der Grundplatte wird in der Mitte der Rückwand ein Haken oder Drahtstift angebracht. Die beiden Anschlußbuchsen werden auf dem Grundbrett befestigt und durch möglichst starke Kupferleitungen mit den beiden Hitzdrahtklemmen an der Rückwand verbunden. Auf dem Achsstift muß sich die aufgesteckte Zeigerrolle leicht bewegen können. Einer der Hitzdrähte wird möglichst straff zwischen den Hitzdrahtklemmen eingespannt.

Etwaige Isolierungen der Hitzdrähte verkohlen oder verbrennen während der Versuche, es ist unzweckmäßig, sie vorher abzukratzen, weil dabei leicht der Draht beschädigt wird, das heißt, an einzelnen Stellen einen kleineren Durchmesser erhält und später dort abschmilzt (durchbrennt). Wir hängen nun in die Mitte des Hitzdrahtes lose die Schnur mit dem einen Haken ein, legen sie einmal um die Rolle, befestigen am Haken des anderen Schnurendes die Wendelfeder und diese wiederum an dem festen Haken unten in der Rückwand. Schnur und Feder müssen so straff sitzen, daß die Zeigerrolle in ihrer Lage festgehalten wird.

Wir lockern die Schnur etwas und stellen den Zeiger auf den Nullpunkt der Skale, der links liegen muß. Das Meßgerät ist jetzt betriebsbereit. Wir können die Zeigerausschläge unseres Meßgerätes mit der Anzeige eines anderen Geräts vergleichen und unser Gerät in Ampere beziehungsweise Volt eichen; die endgültige Skale wird dabei nicht linear sein. Die Abbildung auf Seite 218 zeigt das Prinzip, nach dem alle thermischen Meßgeräte gebaut sind – auch unseres.

Die Schwierigkeit beim Bau dieser Hitzdraht-Meßgeräte liegt in der richtigen Wahl des Hitzdrahtes. Wählt man ihn so dick, daß er stärkere Ströme

*Wir eichen
unser Meßgerät*



durchläßt, so ist das Gerät zu unempfindlich; ein dünner Draht dagegen schmilzt leicht. Man baut die Hitzdraht-Meßgeräte mit Drähten von 0,03 bis 0,35 mm Durchmesser. Die größte Stromstärke, die man unmittelbar durch das Gerät schicken kann, beträgt 0,5 A. In der Praxis wird der Hitzdraht meist aus Platin-Iridium wegen des hohen Schmelzpunktes dieser Legierung hergestellt. Der hohe Schmelzpunkt erlaubt eine gewisse Überlastung des Meßgerätes. Auch Nickel-Stahl-Hitzdrähte haben sich bewährt. Für größere Meßbereiche werden mehrere Hitzdrähte nebeneinandergeschaltet. Im allgemeinen werden Strommesser mit Meßbereichen zwischen 0,5 und 5 A bei einem Eigenverbrauch von 0,5 bis 1 Watt und Spannungsmesser mit Meßbereichen zwischen 3 und 300 V bei einem Eigenverbrauch von 0,3 bis 20 Watt hergestellt. Bei höheren Spannungen (bis 3000 V) verwendet man Vorwiderstände; auch Spannungswandler sind bei Wechselspannungen benutzbar. Mit Hilfe von Nebenwiderständen kann der Meßbereich der Hitzdraht-Strommesser auf mehrere hundert A erweitert werden. Bei Wechselstrom sind auch Stromwandler benutzbar.

Wir eichen unser Hitzdraht-Meßgerät als Strommesser

Dazu leihen wir uns einen Strommesser mit den Meßbereichen 0 bis 1 A und 0 bis 10 A, dazu einen Gleitwiderstand (R) von etwa 30 Ohm, bis 10 A belastbar, und einen Gleitwiderstand (R_N) von etwa 12 Ohm, ebenfalls hoch belastbar. Als Spannungsquelle eignet sich am besten ein Akkumulator 6 bis 12 V, im Notfall 5 Taschenlampenbatterien, die parallelgeschaltet sind (alle kurzen Pluspole miteinander und alle langen Minuspole miteinander verbunden). Zum Parallelschalten nimmt man am besten zwei Streifen aus Kupfer- oder Messingblech, die der Länge nach in der Mitte gefaltet sind; der eine Streifen wird über alle Minuspole, der andere über alle Pluspole geschoben und dort mit der Flachzange festgeklemmt. Das ist eine „Schaltung auf Strom“. Fünf parallelgeschaltete Taschenlampenbatterien liefern auch nur 4,5 V Spannung, aber den fünffachen Strom einer einzelnen Batterie. Wir schalten nach dem Bild auf Seite 219. Ein Strommesser muß stets irgendwo im Stromkreis liegen, das heißt ein Teil von ihm sein. Die beiden Strommesser werden hintereinander in den Stromkreis gelegt; da derselbe Strom durch beide fließt, zeigen ihn beide Geräte gleichzeitig an. Wir lassen den Widerstand R_N (in der Schaltung gestrichelt angeschlossen) zunächst fort und schalten den Gleitwiderstand voll ein, um mit kleiner Stromstärke zu beginnen. A_1 ist der geliehene Vergleichs-Strommesser, A_2 unser Hitzdraht-Strommesser, der geeicht werden soll. A_1 wird auf den Meßbereich 0 bis 1 A geschaltet.

Schließen wir mit dem Schalter S den Stromkreis, so fließt zunächst nur ein kleiner Strom. Wir stellen mit Hilfe des Gleitwiderstandes R nacheinander die Stromstärken von 0,1 bis 1 A ein — immer um 0,1 A stärker, also 0,2, 0,3, 0,4 und so fort. A_1 zeigt sie uns an, auf der Skale von A_2 machen wir einen entsprechenden Vermerk. Die Abbildung auf Seite 219 zeigt auch die Ansicht dieser Versuchsanordnung; A_1 zeigt etwa 0,8 A an. Sind die Aus-

schläge bei A_2 zu schwach, so nehmen wir einen empfindlicheren (dünneren) Hitzdraht; hier müssen die verschiedenen Werkstoffe auf größte Ausdehnung bei nicht zu großem elektrischem Widerstand nacheinander geprüft werden.

Wir können grundsätzlich auch mit Wechselstrom aus dem Netz eichen. Leider dürfen wir nicht einfach die nächste Steckdose als Spannungsquelle nehmen! Zunächst ist das verboten, denn unser Aufbau mit seinem Berührungsschutz ist nicht für 220 V zugelassen; ein Arbeiten wäre lebensgefährlich! Ferner passen die Widerstandsgrößen nicht mehr; wir würden einen zu großen Strom erhalten und die Meßgeräte zerstören.

Hier gibt es nur eine Möglichkeit: mit einem Umspanner hoher Leistung arbeiten, der sekundär bis 10 A bei 12 bis 24 V gibt. Einen solchen Sekundäranschluß können wir dann unbesorgt als Spannungsquelle benutzen; der Primäranschluß am Netz muß den Vorschriften entsprechen.

Der elektrische Strom hat stets ein magnetisches Feld um sich

Irgendwie war die Sache sehr merkwürdig. Der gute alte Magnet war bekannt – als „Dauermagnet“, auch in Form der Kompaßnadel, die sich auf einer feinen Spitze drehen kann und sich stets in Nord-Süd-Richtung des erdmagnetischen Feldes einstellt. Die Seefahrer haben ihn schon viele Jahrhunderte benutzt, um auf See die Fahrtrichtung ihres Schiffes zu erkennen. Einen Nordpol hat der Magnet und einen Südpol dazu. Einen positiven Pol hat das Galvanische Element und einen negativen dazu. Hier und dort Polarität – nun, das war noch nicht so auffallend. Aber daß gleichnamige Magnetpole einander ebenso abstießen wie gleichnamige elektrische Ladungen, daß die ungleichnamigen Pole im Magnetismus und in der Elektrizität einander anzogen – das konnte man nicht einfach hinnehmen. Über diese gleichartigen Wirkungen mußte man nachdenken. Das taten auch viele kluge Köpfe. Man machte Versuche, magnetische Kräfte in der Voltaschen Säule nachzuweisen, und hängte beispielsweise eine Säule waagrecht beweglich an Seidenfäden auf. Sie sollte sich dann wie eine Magnethnadel in der Nord-Süd-Richtung einstellen. Der Erfolg mußte ausbleiben, weil man noch nicht begriffen hatte, daß der fließende Strom das Neue und Wirkungsvolle ist und daß dafür ein geschlossener Stromkreis vorhanden sein muß.

Einer hatte begriffen, worum es ging: Hans Christian Oersted (1777 bis 1851). Er kam nicht durch Zufall auf seine Entdeckung. Er wußte, daß der elektrische Strom eine chemische Wirkung – zum Beispiel das Zersetzen von Wasser – hat; ein dünner Platindraht im Stromkreis einer starken Voltaschen Säule war beim Experimentieren glühend geworden; eine Magnethnadel in der Nähe eines Blitzableiters war während eines starken Gewitters in Schwingungen geraten. Das alles regte Oersted sehr zum Nachdenken an. Hinzu kam, daß er gern und viel experimentierte, auch in seinen zahlreichen Vorlesungen als Professor der Universität Kopenhagen. Um den Zusammenhang zwischen Magnetismus und elektrischem Strom durch ein Experiment zu untersuchen, baute Oersted eine sehr umfangreiche Versuchsanordnung auf. Er benutzte eine Voltasche Becherbatterie aus 20 großen Elementen, die er technisch etwas verändert hatte.

Die Magnetnadeln tanzen

Oersted führte einen Platindraht parallel über eine ruhende Magnetnadel, also in Nord-Süd-Richtung, und schickte dann den starken Strom seiner Batterie durch den Draht. *Und die Nadel tanzte.* Man schrieb den 21. Juli 1820.

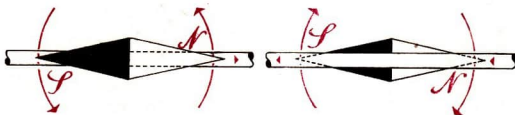
Wir werden noch erfahren, welche Fragen die Erkenntnis dieses neuen Naturgesetzes gehabt hat. Oersted tat nun, was alle Forscher in solcher Lage tun: Er begann seine Entdeckung durch viele bestätigende Versuche zu sichern, zu beweisen und im Bereich ihrer Erkenntnis zu erweitern. Er wiederholte zunächst mehrmals den Versuch und stellte Genaueres fest: Bei einem Abstand von etwa 3 cm zwischen Leiter und Magnetnadel bewegt sich diese um etwa 45° . Wird der Abstand größer, so wird die Abweichung der Nadel kleiner – und umgekehrt.

Weiter: Je stärker der Strom im Leiter ist, desto stärker schlägt die Nadel aus. Damit hatte Oersted den Grundgedanken des *Galvanometers* gefunden und zugleich die Möglichkeit, die Stärke seiner Ströme auf zuverlässigere und genauere Art zu erkennen als bisher. Der Bau von Galvanometern ließ auch nicht lange auf sich warten.

Dabei beobachtete Oersted eindeutig, daß nicht die Spannung, sondern die Stromstärke die Größe der Nadelausschläge bedingt. Er schreibt dazu selbst: „Eine Voltasche Säule aus 100 Platten wirkt nicht merklich. – Dagegen bringt ein einziges Voltasches Element von 6 Quadratzoll eine beträchtliche Wirkung hervor. – Ein Voltasches Element von 100 Quadratzoll wirkt noch in 3 Fuß Entfernung deutlich auf die Nadel. 40 derartige Elemente hintereinander geschaltet wirken nicht stärker, sondern eher schwächer.“ Das erklärt Oersted mit einer „Verminderung der leitenden Kraft, welche der Vermehrung der Elemente des Apparates zuzuschreiben ist“. Auch hier finden wir Ansätze zum Ohmschen Gesetz, das erst 5 Jahre später entdeckt worden ist.

Als nächstes: Liegt der stromführende Draht *über* der Magnetnadel und tritt die negative Elektrizität über den Südpol ein, so wird der Nordpol nach Westen (und der Südpol nach Osten) abgelenkt. Liegt der Leiter *unterhalb* der Nadel, so schlägt diese nach der entgegengesetzten Richtung aus.

André Marie Ampère (1775 bis 1836) hat das mit seiner „Schwimmerregel“ etwa so ausgedrückt: Denkt man sich mit dem elektrischen Strom schwimmend (von + nach –), mit dem Gesicht zur Magnetnadel, so zeigt der ausgestreckte linke Arm die Richtung an, in der sich der Nordpol der Nadel bewegt.

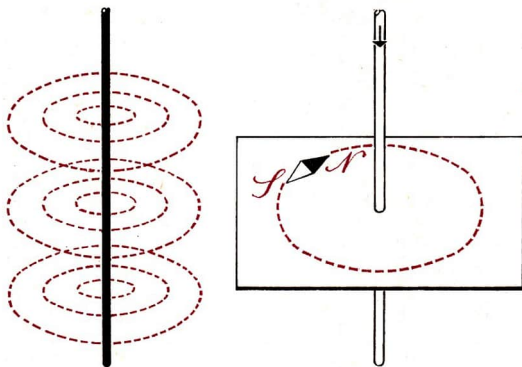


„Mit dem Strom schwimmend, von Plus nach Minus“ – das ist wieder diese unglückliche Sache, denn wir wissen doch, daß der elektrische Strom von Minus nach Plus geht, von der Stelle des Elektronenüberschusses zur Stelle des Elektronenmangels. Wir wissen es, aber die Alten wußten nichts von Elektronen und irrten sich in der Stromrichtung des äußeren Stromkreises (außerhalb der Spannungsquelle). Der äußere Stromkreis bildet mit dem inneren (im Element) wiederum einen Kreis; unsere Abbildung auf Seite 205 vom Voltaschen Element zeigt das. Die „innere“ Stromrichtung verläuft von Plus nach Minus.

Daß man im vergangenen Jahrhundert an einen Stromfluß von Plus nach Minus glaubte und darauf die Regeln aufbaute, ist also kein Zufall. Man beobachtete, wie bei der Elektrolyse das Metall von der Anode (+) zur Katode (–) wanderte und sich dort ansetzte.

Alle Regeln, die mit der Stromrichtung zu tun haben, sind also falsch. Es wäre jedoch sehr umständlich und zeitraubend, sie alle in sämtlichen Lehr- und Fachbüchern umzuändern; deshalb läßt man die falsche Richtung stehen und nennt sie, wie schon erwähnt, die technische Stromrichtung. Der Technik ist es gleichgültig, welche Richtung angenommen wird – Hauptsache, sie wird im ganzen technischen Betrieb gleich benutzt. Der Physiker muß bei seinen Überlegungen genau sein; er arbeitet mit der „richtigen“ Richtung (von Minus nach Plus) und nennt diese die Elektronenstromrichtung.

Oersted untersuchte verschiedene Werkstoffe und leitete den Strom durch Drähte aus Platin, Gold, Silber, Messing, Eisen, Zinn, Blei und Quecksilber



Das magnetische Feld um einen stromdurchflossenen Leiter bildet Feldlinien in Form gleichmüttiger Kreise mit dem Leiter als Mittelpunkt

(in einer Glasröhre). „Die Natur des Metalles verändert den Erfolg nicht, es sei denn vielleicht in Hinsicht der Größe“, schreibt der Forscher am 21. 7. 1820. Er legt zwischen Leiter und Nadel nacheinander je eine Zwischenschicht aus Glas, Holz, Metall (außer Eisen), dann ein irdenes Gefäß mit und ohne Wasser, ferner Steine, Nichtleiter anderer Art; die Nadel wurde weiterhin abgelenkt – sogar durch eine dreifache Schicht aus Glas, Messing und Holz.

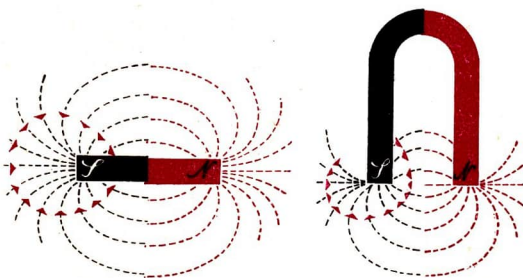
Oersted erkennt: Die Kraft, die die Magnetnadel ablenkt, muß Magnetismus sein, und sie ist etwas ganz anderes als die Elektrizität; dieser *Magnetismus ist eine Wirkung des elektrischen Stromes*, und zwar auf „magnetische Körper“, beispielsweise Eisen.

Damit sind die drei wichtigsten Wirkungen des elektrischen Stromes nun 1820 bekannt: die chemische Wirkung, die Wärmewirkung und die magnetische Wirkung. Und immer noch sind wir an der winzigen Quelle der Entwicklungen . . .

Oersted war noch längst nicht zufriedengestellt. Jetzt wollte er genau wissen, in welcher Form sich diese magnetische Wirkung des elektrischen Stroms äußert. Er stellte einen Draht zur Abwechslung einmal senkrecht auf und schickte einen starken Strom hindurch. Da wurde etwas sehr Merkwürdiges ganz deutlich: Niemals wurde eine Magnetnadel vom Draht selbst angezogen, so daß eine Spitze etwas auf den Draht zeigte oder gar an ihm haften blieb wie an einem natürlichen Magneten.

Seltsam, sehr seltsam: Man konnte die Magnetnadel im Kreise um den Draht herumführen, und sie machte diesen Kreis mit, das heißt, sie war gewissermaßen immer ein Stück dieses Kreises (Bild auf Seite 224)!

Wieder hatte Oersted richtig beobachtet: Das magnetische Feld um den Leiter, wie wir heute sagen, zeigt sich tatsächlich in gleichmittigen (konzentrischen) Kreisen, die wir *Feldlinien* nennen; der gemeinsame Mittelpunkt ist allemal der Leiter. In einem Versuch werden wir das später besonders deutlich sehen. Wir können uns am besten an Hand einer Zeich-



Feldlinienverlauf beim Magneten

nung klarmachen, warum die Magnetnadel wie ein Karussellpferdchen um den senkrechten Leiter herumläuft.

Man geht von der Annahme aus, daß bei einem Magneten die Feldlinien stets aus dem Nordpol austreten, das Magnetfeld durchlaufen und im Südpol wieder in den Magneten eintreten.

Im Magnetfeld (in Eisen überhaupt) laufen die Feldlinien unsichtbar weiter. In der Karussellbahn der Feldlinien um den stromführenden Leiter liegt im allgemeinen kein Eisen; deshalb zeichnet man sie als Kreise (schräg gesehen als Ellipsen) ganz aus. Wir brauchen jetzt nur einen einzigen Feldlinienkreis zu zeichnen und die Magnetnadel als Teil des Kreises zu nehmen – und schon wird uns klar, was Oersted beobachtete. Selbstverständlich werden wir das auch bald selber ausprobieren; bitte nur noch ein wenig Geduld!

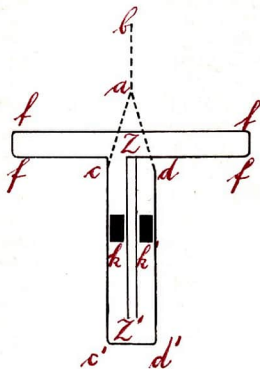
Bisher hatte Oersted seinen Draht immer mehr oder weniger fest gespannt und die Magnetnadel sich bewegen lassen. Der Gedanke lag nahe, es einmal umgekehrt zu versuchen: den Draht vor einem feststehenden Magneten beweglich zu machen. Oersted vermutete, daß dann beide Magnetfelder, das des stromdurchflossenen Drahtes und das des festen Magneten, einander beeinflussen; und da nur der Draht beweglich ist, müßte er nachgeben und ausweichen. Vielleicht könnte sich dann der Draht sogar als eine Art Magnetnadel zeigen und sich in der Nord-Süd-Richtung einstellen?

Oersted baute eine Drahtschleife mit Batterie und hängte das Ganze an Fäden auf. Die Abbildung auf Seite 227 soll das erläutern. Er beschreibt die Anordnung so „c c' d' d ist ein mit angesäuertem Wasser gefüllter Kasten mit möglichst dünnem Kupferblech von $\frac{1}{2}$ Zoll Breite, 3 Zoll Höhe und 4 Zoll Länge, welch letztgenannte Dimension sich senkrecht in die Zeichenebene hinein erstreckt. Z Z' ist ein dünnes Zinkblech, welches durch zwei Korke k und k' in der Mitte des Kupferkastens gehalten wird. cfffZ ist ein Messingdraht, der mit seinen Enden an der Kupferwand beziehungsweise an der Zinkplatte befestigt ist und den Strom von c über fff nach Z leitet; ba ist ein möglichst dünner Torsionsdraht aus Messing; ad und ac sind zwei Hanffäden.“

1 Zoll können wir mit 2,5 cm ansetzen. „Torsionsdraht“ bedeutet, daß er beim Drehen der Anordnung selbst seiner Länge nach etwa verdreht wird und infolge seiner Elastizität wieder in seine alte Lage zurück will. Das Kupferkästchen hat einen viereckigen Querschnitt.

Leider war dieser ganze Aufbau zu schwerfällig, zu wenig beweglich; die Drahtschleife war zudem an den Seiten viel zu kurz. Dadurch konnte Oersted nicht erreichen, daß sich die stromdurchflossene Schleife wie eine Magnetnadel benahm. Dieser Versuch gelang erst (im selben Jahre) dem Dresdener Generalarzt Raschig und dem Physiker Erman. Raschig baute das ganze Gerät viel kleiner; statt des Kupferkästchens benutzte er beispielsweise einen kleinen silbernen Fingerhut.

Einen großen Erfolg hatte Oersted jedoch, als er einen starken Magneten an eine Seite seiner Drahtschleife brachte: Die Schleife bewegte sich! Das war eine grundlegende Entdeckung: Ein feststehendes Magnetfeld setzt einen stromdurchflossenen Leiter in Bewegung. Wir sprechen hier vom



Bewegliche, stromdurchflossene
Drahtschleife, nach einer Zeichnung
von Oersted
Aufbau beim Oerstedschen Versuch

elektromotorischen Prinzip, nach dem fast alle Elektromotoren arbeiten; die im „Ständer“ des Motors durch Elektromagnete erzeugten starken Magnetfelder setzen den „Läufer“ mit den stromdurchflossenen Spulen in umlaufende Bewegung. Das Grundsätzliche dabei ist die einfache Erscheinung, daß zwei Magnetfelder aufeinander einwirken.

Andere Forscher der damaligen Zeit nahmen die Entdeckungen von Oersted auf und experimentierten weiter: So legten ebenfalls im Jahre 1820 Schweigger in Halle und Poggendorff in Berlin eine Drahtspule um eine Magnetnadel. Mit dieser Anordnung konnten sie auch sehr schwache Ströme messen.

Wir experimentieren weiter

Wir haben als Belohnung für unser ernstes Nachdenken jetzt einige eigene Experimente verdient. Wir wollen daher einige Grundversuche durchführen – und immer daran denken, daß alles, was uns an elektrischen Dingen heute umgibt und erfreut, ohne diese alten Erkenntnisse nicht möglich wäre!

Wir machen magnetische Feldlinien sichtbar

Nötig sind hier 5 bis 7 frische Taschenlampenbatterien, je 4,5 Volt, oder eine Akkumulatorenbatterie mit drei Zellen (6 V); eine Kompaßnadel auf

Ständer; blanker, starker Kupferdraht, etwa 30 cm lang; Pappe, etwa 15 cm mal 15 cm groß, auf mindestens einer Stelle hell und sehr glatt (im Notfall eine Karteikarte); Verbindungsdrähte; Vorrichtung zum Befestigen des senkrechten Drahtes; zwei Streifen Kupferblech, etwa 15 cm lang und 2 cm breit; einige Klemmen, zum Beispiel Krokodilklemmen; Streubüchse mit Eisenfeilspänen; dazu zwei Versuchspersonen!

Ob wir es glauben oder nicht: Sieben nebeneinander- (parallel, „auf Strom“) geschaltete frische Taschenlampenbatterien liefern kurzzeitig an die 25 A! Und diese Stromstärke reicht aus, um ein starkes Magnetfeld um den Leiter herum zu erzeugen; damit können wir die Feldlinien gut sichtbar machen. Die Batterien erholen sich bald wieder und sind dann noch lange in der üblichen Weise zu verwenden.

Zum Parallelschalten stellen wir die Batterien so mit den Breitseiten nebeneinander, daß alle kurzen (positiven) Kontaktstreifen auf der einen Seite und alle langen (negativen) Kontaktstreifen auf der anderen Seite nebeneinanderliegen. Die beiden Kupferstreifen biegen wir der Länge nach in der Mitte zusammen; dann wird je ein passender „Klemmstreifen“ über alle kurzen und über alle langen Kontaktfahnen der Batterien geschoben und mit einer Flachzange gut zusammengedrückt. Wichtig ist bei allen Versuchen, daß alle kontaktgebenden Metallteile schön blank sind!

Bei dieser Parallelschaltung wird die Stromstärke erhöht; alle kleinen Zinkplatten werden gewissermaßen zu einer einzigen großen Zinkplatte, alle kleinen Kohlestangen zu einer einzigen großen Kohlestange zusammengefügt. Je größer die Elektroden sind, um so stärker ist aber der Strom! Er ist gleich der Summe der Einzelströme, die jede einzelne Batterie liefern kann. Die Spannung ändert sich, wie schon früher erwähnt, nicht; sie bleibt in unserem Fall auch nach dem Parallelschalten 4,5 V.

Umgekehrt wirkt die Reihenschaltung, bei der wir die kleinen Elektroden immer abwechselnd zusammenschalten und die beiden äußersten offen lassen — da addieren sich die Einzelspannungen der Batterien oder der Zellen, und die Stromstärke bleibt unverändert.

In unserer Schaltung mit den sieben Taschenlampenbatterien geht es sogar „gemischt“ zu! In jeder Batterie sind nämlich drei kleine Elemente mit je 1,5 V hintereinandergeschaltet, und wir haben diese drei Elemente als „Einzelgruppe“ wiederum parallelgelegt. Im Schaltplan sieht das so aus, wie die Abbildung auf Seite 229 zeigt.

Nun bohren wir mitten in unsere Pappscheibe ein kleines Loch, stecken unseren blanken Draht hindurch und bauen diesen irgendwie so ein, daß er senkrecht fest steht und die Pappe mit der hellen, glatten Seite nach oben ganz waagrecht liegt. Das geht besonders gut mit Stativen, aber auch ohne Schwierigkeiten mit einem Bücherstapel; man steckt die umgebogenen Drahtenden zwischen die Bücher. Die Zuleitungsdrähte werden sorgfältig angeschlossen; einer wird gleich an einer der beiden Kupferschienen befestigt; der andere bleibt noch frei (wenn man ihn nicht über einen in Ruhelage offenen Klingelknopf anschließen will). Aber die Alten hatten noch keine Klingelknöpfe! Die nachstehende Abbildung zeigt die Anordnung des Ganzen.

Auf die Pappe streuen wir jetzt eine gleichmäßige, dünne Schicht Eisenfeilspäne – so dünn, daß die helle Pappe durchschimmert. Das ist nicht so einfach, wie mancher sich das vielleicht denkt. Am besten eignet sich dazu ein gewöhnlicher Salzstreuer. (Hinterher gut säubern, denn Eisenfeilspäne sind als Gewürz völlig ungeeignet!)

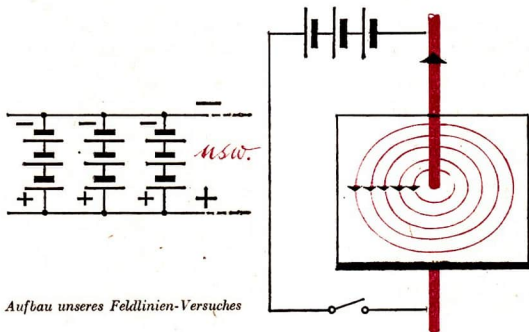
Jetzt kommt der große Augenblick: Genau zur selben Zeit wird der Stromkreis geschlossen und ganz leicht an die Pappscheibe geklopft – eine, höchstens 2 Sekunden lang. Dann hört das Klopfen auf, und sofort danach wird der Stromkreis geöffnet, der Kurzschluß unterbrochen. Am besten führen das zwei Personen durch. Die eine hat das Kommando, sie zählt laut und klopft; die andere schaltet ein und aus.

Wenn alles richtig gemacht wurde, sehen wir das vor uns, was Oersted nur ahnte: die kreisförmig um den Draht liegenden magnetischen Feldlinien.

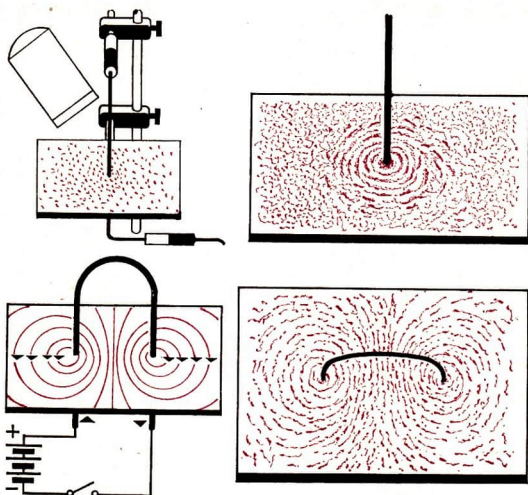
Da wir einmal beim Experimentieren sind, wollen wir noch einige Variationen durchführen: Wir verschieben die Pappe auf beliebige andere Höhen und wiederholen den Versuch. Das Ergebnis bleibt das gleiche, ganz gleich, an welcher Stelle des stromdurchflossenen Drahtes sich die Pappe befindet. Die Folgerung ist leicht.

Schließlich führen wir den Draht zweimal durch die Pappe hindurch. Wir erhalten bei sonst genau gleicher Durchführung des Versuches ein Ergebnis, wie es die Abbildung auf Seite 230 zeigt; zwei Gruppen von Kreisen, die einander im Gedränge der Plattenmitte zwischen den Drahtdurchgängen ziemlich zusammendrücken. Gleichmittige Kreise sind das dadurch nicht mehr.

Die Abbildung zeigt ebenfalls eine Eigentümlichkeit der Feldlinien: Sie benehmen sich wie Gummibänder. Die magnetische Kraft erinnert tatsächlich etwas an Gummi; wir können das beobachten, wenn wir ein Stück Eisen (in diesem Fall „Anker“ genannt) vor einem starken Magneten be-



Aufbau unseres Feldlinien-Versuches



Feldlinien werden sichtbar

wegen. (Damit kein Mißverständnis entsteht: Naturwissenschaftlich gesehen hat die magnetische Kraft nichts, aber auch gar nichts mit Gummi zu tun!)

Die Abbildung zeigt auch, daß die Feldlinien (früher übrigens auch „Kraftlinien“ genannt) eine Richtung haben und daß sie um den Draht herumlaufen. Noch mehr können wir daraus sehen: welche Richtung das ist und daß der Nordpol einer nahen Kompaßnadel von den Feldlinien sozusagen mitgenommen wird. Wir können mit der Kompaßnadel in der Hand den stromführenden Draht umwandern: Die Nadel bleibt stets „in der Feldlinie“.

Die Richtung von Feldlinien können wir also mit einer Kompaßnadel leicht und schnell feststellen: immer in Richtung des Nordpols. Der englische Physiker Maxwell hat da eine wunderschöne Regel aufgestellt, die „Korkenzieher-Regel“: Schraubt man (in Gedanken natürlich!) einen Korkenzieher in der Stromrichtung in den Draht, so gibt seine Drehrichtung die Umlaufrichtung der Feldlinien an.

Wie stellt man die Stromrichtung fest?

Bei diesem Versuch müssen wir wissen, welche Pole der Spannungsquelle wir jeweils vor uns haben. Es gibt mehrere Arten, das festzustellen. Die einfachste ist, von beiden Polen je eine Leitung auf feuchtes „Polpapier“ zu führen und die blanken Enden dicht nebeneinander auf das Papier zu drücken. Unter dem Minuspol entsteht ein roter Fleck (chemische Umsetzung). Das Polpapier ist mit dem chemischen Reagens Phenolphthalein getränkt. Man kann das Papier in Streifen billig kaufen oder durch Tränken mit einer Phenolphthaleinlösung selbst herstellen.

Fast so einfach ist es, die beiden blanken Drahtenden in einen Becher mit einer leicht angesäuerten oder Salzlösung zu tauchen; am negativen Pol entstehen zahlreiche Blasen, am positiven weniger oder gar keine. Was dabei vor sich geht, ist uns bekannt.

Wer ein besonders gut ausgestattetes Labor mit einem Drehspul-Spannungsmesser besitzt (wir bauen uns später selbst einen!), der braucht nur – bei richtigem Meßbereich – die Pole an die Meßgeräteklammern zu halten. Schlägt der Zeiger nach rechts aus, so haben wir richtig geschaltet; wir lesen an den Klemmen die Zeichen $+$ und $-$ ab, die auch auf unsere Batterie zutreffen müssen.

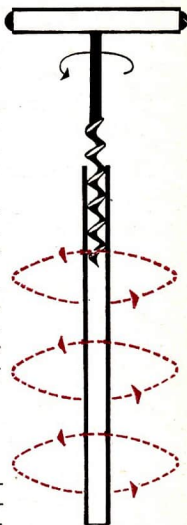
Wir verstärken das magnetische Kraftfeld

Nötig sind: das Schubfach einer Streichholzschachtel; mehrere Meter isolierten Kupferdrahtes, etwa vom Elektromagneten einer elektrischen Klingel oder dergleichen, Durchmesser 0,3 bis 0,5 mm (blank); eine Kompaßnadel, möglichst bis 6 cm lang, auf Ständer; eine Taschenlampenbatterie oder eine Voltasche Becherbatterie; ein einzelnes Volta-Element; etwa 50 cm eines dicken, blanken Kupfer- oder Aluminiumdrahtes; Verbindungsdrähte; Kontaktklemmen.

Wir nehmen von dem Schubfach der Streichholzschachtel nur den Rand; ihn knicken wir in der Mitte der beiden Schmalseiten ein, so daß er in der Abbildung auf Seite 233 gezeigte Form erhält.

Die beiden Spitzen sind etwa 7 cm voneinander entfernt. Auf diesen etwa 13 mm breiten Rahmen wickeln wir unseren dünnen, isolierten Kupferdraht auf – so viel, wie wir haben oder wie draufgeht. Festbinden an einigen Stellen hilft gegen Abrutschen. Anfang und Ende des Drahtes lassen wir 30 bis 50 cm lang herausragen.

Jetzt stecken wir unsere Rahmenspule auf die Ständernadel, auf der sonst die Magnetnadel sitzt. Ist die Ständernadel sehr kurz, dann muß man einen Teil der Ständersäule mit einführen; wichtig ist, daß man in keinem Fall irgendwo die Isolation der Drahtwicklung verletzt! Nun steckt die Spule also auf dem Ständer; wir setzen die Magnetnadel innerhalb der Spule auf die Ständerspitze und drücken die Spule möglichst flach zusammen, so daß oben und unten die Wicklung ganz nahe an der Magnetnadel liegt. Die Nadel muß aber frei beweglich bleiben! Wir haben damit die



Zur Maxwellschen
Korkenzieher-Regel

Urform eines *Galvanoskops* vor uns, das den galvanischen Strom anzeigt. Wenn man damit die Stromstärke (oder die Spannung) auch messen kann, so spricht man von einem *Galvanometer* (vom griechischen *metrein* = messen). Wir stellen das Gerät so auf, daß Wicklung und Magnetnadel genau parallel liegen, das heißt in Nord-Süd-Richtung; die Nadel darf von oben nicht zu sehen sein.

Jetzt kommt das Erstaunliche! Wir bauen eine Volta-Säule zusammen und legen zwischen die Kupferplatte und die Zinkplatte Filterpapier oder Leinen, das wir nur mit Leitungswasser angefeuchtet haben. Wir schließen das Element an unser Galvanoskop (unsere „Multiplikator“) an: Die Nadel zeigt diesen winzigen Strom an!

Das Geheimnis liegt auch darin begründet, daß normales Leitungswasser – im Gegensatz zu destilliertem, chemisch reinem Wasser – Mineralsalze aufgelöst enthält, um so mehr, je „härter“ das Wasser ist (die Seife schäumt dann schlecht). Das genügt zum Befördern der elektrischen Ladungsteilchen im Element.

Mit Kochsalzlösung oder 1 : 10 verdünnter Schwefelsäure, wie wir das gewohnt sind, schlägt die Nadel stärker aus; wir können das versuchen. Wir können auch durch Beobachten und scharfes Nachdenken feststellen, daß unsere Regeln zur Ablenkung der Nadel in der Spule ebenfalls wirken. Im übrigen bewahren wir unser Galvanoskop sorgfältig auf; es wird später noch gebraucht.

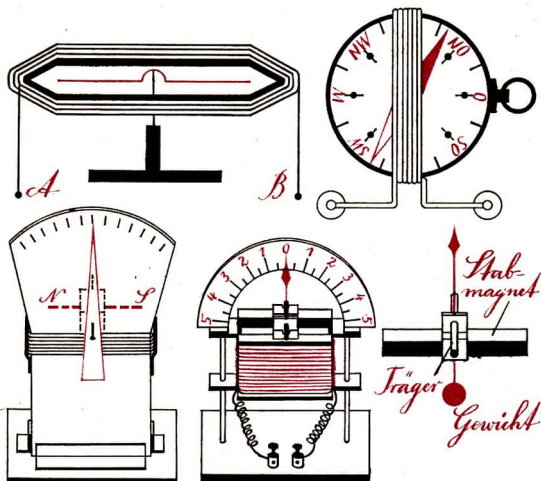
Auch ein Wander- oder Marschkompaß läßt sich durch umgelegte Drahtwindungen, die auf beiden Seiten mit Zwirn zusammengehalten werden, in ein einfaches Galvanoskop verwandeln. Er hat den Vorteil, daß man auf der Gradeinteilung die Nadelausschläge messen und vergleichen kann.

Wir bauen ein Senkrecht-Galvanoskop

Vom Bau des waagerechten Galvanoskops her haben wir noch die Hülse der Streichholzschachtel übrig. Wir verwenden sie für ein senkrechtcs Galvanoskop entsprechend der nebenstehenden Abbildung. – Daraus geht alles Wissenswerte hervor; die Wicklung besteht aus etwa 20 Windungen eines dünnen Kupferdrahts.

Wir wollen uns grundsätzlich merken: Ein Spannungsanzeiger braucht eine Spule mit vielen Windungen eines dünnen Drahtes; er muß einen hohen elektrischen Widerstand haben, weil er stets parallel zum Stromkreis unmittelbar an die Spannungsquelle gelegt wird. Beim Stromanzeiger ist es umgekehrt: Er liegt im Stromkreis, muß allen Strom hindurchlassen und daher einen möglichst geringen Widerstand haben; daher wenige Windungen dicken Drahtes.

Beim Bau von Galvanoskopen können wir wieder unsere schöpferische Phantasie entfalten. Unser kleines Modell kann an Stelle des magnetisierten Nadelstückes auch ein magnetisiertes Stück einer Uhrfeder bekommen. Man magnetisiert, indem man das Stück auf der einen Hälfte mit dem Nordpol, auf der anderen Hälfte mit dem Südpol eines starken Magneten mehrmals bestreicht.



Galvanoskope

Unsere Abbildung gibt ein Beispiel für eine etwas anspruchsvollere Bauart eines Senkrecht-Galvanoskops. Der Rahmen ist aus irgendeinem Blech, außer Eisen. Die Lager für die Achse (beispielsweise aus einem Stricknadelstück) sind zwei angelötete oder angeschnittene Blechstreifen mit je einem runden Ausschnitt, in dem sich die Achse leicht bewegen kann, ohne abzugleiten. Der Magnet ist ein Stab oder ein Stück einer stärkeren Uhrfeder. Die Aufhängung zeigt die Abbildung unten rechts. Den Meßbereich können wir dadurch vergrößern, daß wir unten am Magnetträger einen kurzen, steifen Draht mit einer kleinen Last befestigen.

Die magnetische Schaukel

Der Nachweis, daß ein stromdurchflossener Leiter durch ein fremdes Magnetfeld abgelenkt wird, hat zum elektromotorischen Prinzip geführt; es ist der physikalische Impuls zum Bau von Millionen und aber Millionen von Elektromotoren, die der Menschheit im kleinen und im großen dienen. Wir wollen den Versuch auf eine neuzeitliche Art – mit der „elektrischen Schaukel“ einfacher und leichter darstellen.

Zu diesem Versuch sind nötig: ein Stab aus Glas, Holz oder Plast, 15 bis 20 cm lang; ein Aluminiumstab, etwa 15 cm lang, 2 bis 3 mm Durchmes-

ser; zwei dünne Kupferdrähte, je etwa 50 cm lang; ein möglichst starker Hufeisenmagnet; unsere Batterie aus den nebeneinandergeschalteten Taschenlampenbatterien; Verbindungsdrähte, Stecker und Anschlußklemmen; eine Vorrichtung (zum Beispiel Stativ mit Doppelmuffe), um den Glasstab in einer bestimmten Höhe waagrecht zu befestigen.

Die untenstehende Abbildung zeigt Versuchsanordnung und Schaltung zugleich.

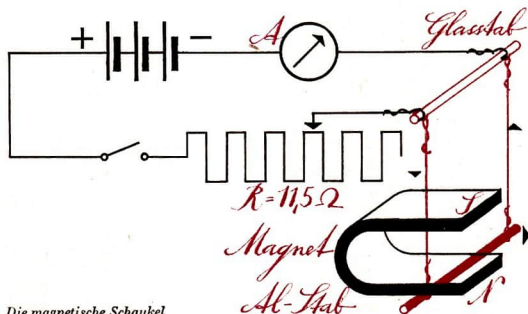
Die Drähte, die den Aluminiumstab tragen, werden an diesem fest, mit gutem elektrischem Kontakt (alles blank!), angebracht. Oben hängen sie blank und locker in Ösen, die aus den blanken Enden der beiden Zuleitungsdrähte (von der Batterie) am Glasstab gebildet werden. Die Schaukel muß leicht „schaukelbar“ sein; trotzdem muß der Strom hindurchfließen können.

Die Schaukel wird so angeordnet, daß der Aluminiumstab mitten vor der Öffnung des Hufeisenmagneten hängt. Lassen wir nun den Strom unserer Batterie in der angegebenen Richtung fließen (die kurzen Kontaktstreifen der Taschenlampenbatterie sind der Pluspol!), so bewegt sich der Aluminiumstab vom Magneten fort. Kehren wir die Stromrichtung um, so wird er in den Magneten hineingezogen.

An Stelle des Aluminiumstabes kann man auch eine Spule einhängen, die ein kurzes Stück über den oberen Schenkel des Magneten ragt. Diese Spule bewegt sich im Versuch ebenso wie der Aluminiumstab.

Wer als Spannungsquelle einen Akkumulator aus einem Kraftwagen benutzen will, muß einen veränderlichen (Gleit-) Widerstand von etwa 10 Ohm in den Stromkreis schalten und den Versuch bei schwachem Strom, das heißt bei voll eingeschaltetem Widerstand, beginnen; andernfalls besteht die Gefahr, daß die Versuchsanordnung durchbrennt.

Über den Zusammenhang zwischen Strom-, Feldlinien- und Bewegungsrichtung gibt die Dreifingerregel Auskunft. Man spreizt den Daumen, den



Die magnetische Schaukel

Mittelfinger und den Zeigefinger der rechten Hand rechtwinklig zueinander. Bringt man den Daumen in die Richtung des Stroms (der „Ursache“) und den Zeigefinger in die Richtung der Feldlinien (von Nord nach Süd, „Vermittlung“), so zeigt der Mittelfinger die gesuchte Bewegungsrichtung („Wirkung“) an. Das ist nicht so schwierig, wie es sich vielleicht liest.

Wir bauen ein Drehspul-Meßgerät

Die Wirkungsweise eines Drehspul-Meßgeräts beruht darauf, daß ein stromführender Leiter (hier eine Spule) von einem fremden Magnetfeld abgelenkt wird; der Leiter führt selbst ein Magnetfeld, und beide Felder beeinflussen einander. Wir wenden das Prinzip der Oerstedschen Leiterschleife und unserer elektrischen Schaukel in einem Meßgerät an, das wir in unserem Labor sehr gut verwenden können. Ein Drehspul-Meßgerät ist (ohne Gleichrichter) zwar nur für Gleichstrom zu verwenden, aber es hat eine lineare Skale, so daß wir die Meßwerte überall gleich genau ablesen können. Die Abbildung auf Seite 236 zeigt die Ansicht des selbstgebauten Drehspul-Meßgeräts.

Zum Bau sind nötig: Grundbrett, etwa 20 cm mal 10 cm; Rückwand, etwa 14 cm hoch; 2 Anschlußbuchsen; etwa 20 m Kupferdraht, 0,2 mm Durchmesser; Hufeisenmagnet (zum Beispiel aus einem alten Kurbelinduktor); ein Streifen dünnes Aluminiumblech, etwa 12 cm mal 2 cm; 12 cm Kupfer- oder Messingdraht, etwa 2 mm Durchmesser, für die Achsen; 12 cm Aluminiumdraht für den Zeiger; Skale aus starkem Papier oder Pappe.

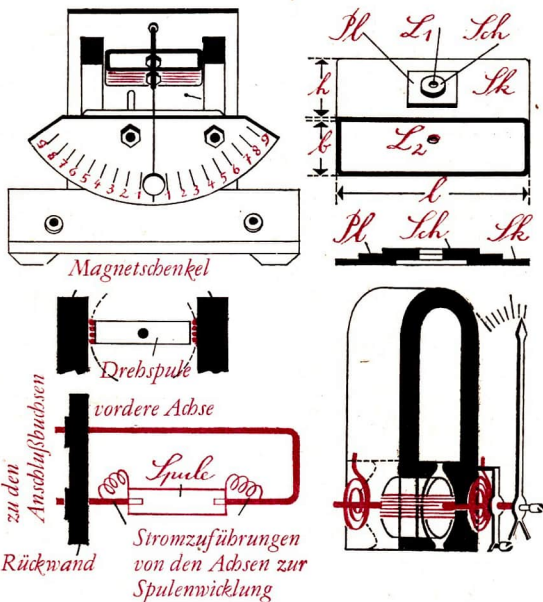
Wir befestigen die Rückwand mit Leim, Nägeln oder Schrauben am Grundbrett und den Hufeisenmagneten an der Rückwand. Der viereckige Spulenkörper, den die umstehende Abbildung zeigt, ist aus Aluminiumblech. Die Spule (Spulenkörper und Wicklung) soll sich leicht, jedoch möglichst nahe an den Polen des Magneten bewegen; die Spulenlänge l ist daher etwas geringer als der lichte Abstand der Magnetschenkel.

Die Breite b der Spule ist gleich der des Magneten. Die Spulenhöhe h soll so groß sein, daß genügend Platz zum Einsetzen des isolierten Lagers L_1 vorhanden ist.

Das Lager L_2 ist eine Bohrung, deren Durchmesser dem zugehörigen Lagerstift entspricht. Das Lager L_1 ist eine kleine Metallscheibe Sch mit Bohrung; die Scheibe wird auf dem Isolierplättchen Pl befestigt. Pl wird über einer größeren Bohrung im Spulenkörper so befestigt, daß der Lagerstift (die Achse) zu L_1 nicht mit dem Spulenkörper in Berührung kommen kann. Wir bewickeln die Spule mit möglichst viel Kupferdraht von 0,2 mm Durchmesser. Das eine Ende des Drahtes wird mit dem Spulenkörper, das andere mit der Lagerscheibe Sch elektrisch leitend verbunden. Die Wicklung darf die freie Bewegung der Spule nicht behindern, also die Achsen nicht berühren. Die rückseitige Achse (der Lagerstift) wird in der Mitte zwischen den Magnetschenkeln befestigt, so daß die Spule im Magnetfeld schwingt.

An der Vorderseite der Drehschule bringen wir den Zeiger aus Aluminiumdraht an. Die Spule steckt man auf den kurzen Lagerstift, führt den vorderen (gewinkelten) Stift in das andere Lager ein und befestigt den vorderen Lagerstift in der Rückwand. Beide Lagerstifte dürfen einander nicht berühren. Um eine sichere Stromzuführung zur Drehschule zu gewährleisten, verbindet man die Achsen durch zwei angelötete Wendeln aus dünnem, weichem Kupferdraht mit dem Spulenkörper und dem isolierten Lager. Bei industriell gefertigten Drehschul-Meßgeräten wird der Meßstrom über zwei Spiralfedern, die zugleich Rückstellfedern sind, der Spule zugeleitet. Das Magnetfeld, in dem sich die Spule bewegt, muß möglichst gleichförmig (homogen) sein, um eine gleichmäßige Ablenkung der Spule und damit eine entsprechend lineare Skaleneinteilung zu erzielen. In unserem Modell kann die Homogenität mit einfachen Mitteln nicht erreicht werden.

Drehschul-Meßgeräte



In der Praxis setzt man an die Schenkel des permanenten Magneten (Dauermagneten), der das Magnetfeld liefert, Polschuhe mit zylindrisch ausgeschliffenen Flächen. Außerdem befestigt man innerhalb der Drehspule den zylindrischen Weicheisenkern, um den sich die Spule dreht. Sie bewegt sich also in den zwei schmalen Luftspalten zwischen dem Weicheisen-Zylinder und den Polschuhen. Die Achse der Drehspule wird im allgemeinen auf Spitzen gelagert, um die Lagerreibung möglichst klein zu halten.

Drehspul-Meßgeräte, auch unser Modell, haben im allgemeinen eine hochohmige Drehspule – mit vielen Windungen dünnen Drahtes; dadurch sind sie zunächst zum Messen von Spannungen geeignet (unmittelbar an die Spannungsquelle anzuschließen). Will man den Meßbereich noch vergrößern, so schaltet man einen Vorwiderstand in Reihe zum Meßgerät. Die zu messende Spannung verteilt sich dann auf Vorwiderstand und Spule; diese erhält nur noch so viel von der Spannung, wie ihr elektrischer Widerstand im Verhältnis zum Gesamtwiderstand (Vorwiderstand und Spule) groß ist.

Ein Beispiel: Die Drehspule hat 100 Ohm, der Vorwiderstand 200 Ohm, und die zu messende Spannung ist 30 V. Diese 30 V verteilen sich dann auf $200 + 100 = 300$ Ohm; auf die Spule entfallen noch 10 V ($300 : 100 = 30 : 10$). Der Vorwiderstand „vernichtet“ 20 V. Der Meßbereich des Meßgeräts ist in diesem Fall verdreifacht worden. Der Physiker spricht von Spannungsabfall; er beträgt am Vorwiderstand 20 V und an der Drehspule 10 V.

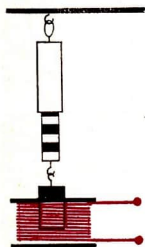
Ein Strommesser muß, weil er mitten im Stromkreis (zwischen Stromquelle und „Verbraucher“) liegt, einen möglichst kleinen („inneren“) Widerstand haben. Soll ein Drehspul-Meßgerät für einigermaßen ansehnliche Stromstärken benutzt werden, so müssen wir dem Strom schon eine Brücke bauen – genauer: eine breite Umgehungsstraße, über die der weitaus größte Teil des Stroms läuft. Das ist der Parallelwiderstand (Nebenwiderstand, auch Shunt genannt – ausgesprochen „schönt“, mit ganz kurzem ϕ wie in köstlich). Die beiden Teilströme in Spule und Parallelwiderstand verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände; wir haben das schon beim Eichen unseres Hitzdraht-Meßgeräts kennengelernt.

Wer nun sehr genau mitgedacht hat, wird selbst darauf gekommen sein: Was unser Drehspul-Meßgerät als Strommesser mit einem dicken Nebenwiderstand mißt, ist nichts anderes als der Spannungsabfall an diesem Widerstand!

Als Spannungsmesser wird unser Drehspul-Meßgerät geeicht, indem wir es parallel mit einem Vergleichsgerät an eine veränderliche Spannungsquelle legen; als Strommesser wird es wie unser Hitzdraht-Meßgerät geeicht: beide in Reihe im Stromkreis mit veränderlicher Stromstärke.

Wir bauen ein Weicheisen-Meßgerät

Das Weicheisen-Meßgerät wollen wir nicht nur der Vollständigkeit wegen bauen (das System fehlt uns noch im Labor!), sondern weil es leicht her-



zustellen ist, recht zuverlässig arbeitet und für Gleichstrom und Wechselstrom zu verwenden ist. Der Grundgedanke ist denkbar einfach: Ein Stück Weicheisen wird in eine stromdurchflossene Spule (Feldspule) durch deren Elektromagnetismus hineingezogen, um so tiefer, je stärker der Strom fließt; die Bewegung wird auf einen Zeiger übertragen. Man hat es dabei ganz in der Hand, mit wenigen Windungen dicken Drahtes einen Strommesser oder mit vielen Windungen dünnen Drahtes einen Spannungsmesser entstehen zu lassen; ganz Geschickte bauen verschiedene Feldspulen, die man auswechseln kann.

Wer es sich ganz leicht machen will, hängt ein Stück Weicheisen an einem Zugkraftmesser in eine Spule; er kann den Zugkraftmesser ohne weiteres in Ampere eichen. Zünftig sieht das Ding freilich nicht aus; bauen wir deshalb lieber das Modell, das uns die nebenstehende Abbildung zeigt. Dazu sind nötig: Grundbrett, etwa 20 cm mal 10 cm; Rückwand, etwa 23 cm hoch; 2 Anschlußbuchsen; 1 Spannungsspule mit rechteckiger Öffnung, mit etwa 80 m Kupferdraht, 0,2 mm Durchmesser; 1 Stromspule mit rechteckiger Öffnung, mit etwa 20 m Kupferdraht, 1 mm Durchmesser, bewickelt; 50 cm ungeglühter Kupferdraht mit kleinem Durchmesser für die Rückstellfeder; 3 Drahtstifte oder Haken, etwa 3 cm lang, 1 Stift aus Nicht-eisenmetall (Achsstift für den Hebel), etwa 3 cm lang, etwa 4 mm Durchmesser; 1 Eisenkern aus gut durchgeglühtem, weichem Eisen, etwa 4 cm lang, der mit viel Spielraum in die rechteckige Öffnung der Spule paßt; einige Unterlegscheiben, die auf den Lagerstift (Achsstift) zu schieben sind; 1 Vierkantstab aus Plast oder Holz, 7 cm mal 1,4 cm mal 1 cm groß, als Hebel; 20 cm Aluminiumdraht, etwa 1 mm Durchmesser, als Zeiger; 1 Skale aus starkem Papier oder Pappe; 2 Anschlagstifte für den Zeiger.



Weicheisen-
Meßgeräte

Wir befestigen die Rückwand am Grundbrett mit Leim, Nägeln oder Schrauben. Der eine Spulenkörper (der leicht aus Pappe mit aufgeleimten Abschlußscheiben hergestellt werden kann) wird mit dem dünnen Draht, der andere mit dem dickeren Draht bewickelt; die Drahtenden müssen so lang sein, daß sie bis zu den Anschlußbuchsen geführt werden können. Mit Isolierband können die Wicklungen befestigt werden.

Die Spule mit dem dickeren Draht geringerer Länge befestigen wir auf dem Grundbrett (zum Beispiel durch Aufstecken auf einen kurzen Holzstift, der auf das Grundbrett geleimt ist und in die Öffnung der Spule paßt, oder durch eine Federklemme an der Rückwand); die beiden Drahtenden werden an die Anschlußbuchsen geklemmt. Etwa 9,5 cm über dem Grundbrett wird der Metallstift (Achsstift) in der Rückwand fest angebracht; er soll um etwa zwei Drittel der Spulentiefe aus der Rückwand herausragen. Als Achsstift ist ein Steckerstift mit Gewinde zum Verschrauben in der Rückwand gut geeignet.

Die Maße für den Hebel sind der nebenstehenden Abbildung zu entnehmen. Man befestigt den Zeiger in z, hängt den Weicheisenkern mit einem Drahtstück in die Bohrung k und die Rückstellfeder, die aus dem dünnen, ungeglühten Kupferdraht gebogen wird, zunächst in die Bohrung c.

Wir schieben den Hebel mit der Bohrung beziehungsweise dem Lager s über den Lagerstift und stecken den Weicheisenkern in die Spule; er soll bei

waagerechtem Hebel einige mm in die Spule ragen und sich leicht darin bewegen. Der Hebel muß genau über der Mitte der Spule liegen; daraus ergibt sich sein Abstand von der Rückwand.

Unterhalb der Bohrungen a, b und c werden Drahtstifte, Häkchen oder Schrauben, die die Rückstellfeder unten festhalten sollen, in der Rückwand angebracht. Sie sollen so weit wie der Lagerstift aus der Rückwand herausragen und werden so hoch angebracht, daß die Rückstellfeder den Hebel gerade waagrecht hält.

Das untere Ende der Rückstellfeder wird an dem der Bohrung c entsprechenden Haken eingehängt.

Zum Schluß wird oben an der Rückwand eine Skale, in cm und mm unterteilt, so angebracht, daß der Zeiger gut vor ihr spielt. Ihr Halbmesser ist gleich der Zeigerlänge. Links und rechts von der Skale wird je ein Anschlagstift für den Zeiger befestigt.

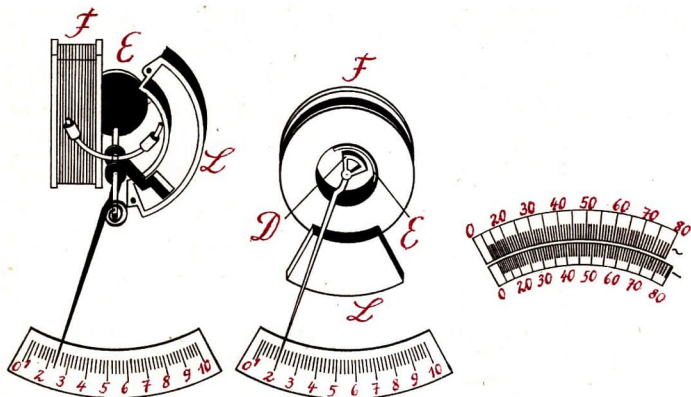
Die elektrotechnische Praxis verwendet mehrere Bauarten des Weicheisen-Meßgerätes, vor allem das Flachspul-Meßwerk und das Rundspul-Meßwerk. Beim Flachspul-Meßwerk wird der Weicheisenkern E in die Feldspule F hineingezogen. L ist die (geöffnet gezeichnete) Luftkammer für die Dämpfung der Kern- und Zeigerbewegung. Die Spirale vorn ist die Rückstellfeder (Abbildung auf Seite 240).

Beim Rundspul-Meßwerk sind D und E Eisenstückchen, die beim Messen gleichnamig magnetisiert werden und daher einander abstoßen. F ist wieder die Feldspule und L die Luftkammer für die Dämpfung. Ein leichter Metallflügel in einem geschlossenen Luftraum wirkt durch den Luftwiderstand bei Bewegungen als Bremse.

Der Zeigerausschlag eines Weicheisen-Meßgeräts ist von der Stärke des magnetischen Feldes abhängig, das in der Feldspule erzeugt wird; diese Feldstärke wiederum hängt von der Anzahl der Drahtwindungen der Spule und von der Stromstärke in den Windungen ab.

Während der Messung wird die Spule zum Magneten (Elektromagneten). Der Eisenkern an der Spulenöffnung wird im Magnetfeld der Spule durch Induktion selbst zum Magneten, und zwar mit entgegengesetzter Polarität; das heißt, wenn die Spule an der Kernseite einen Nordpol hat, so wird das Ende des Kerns, das in die Spule hineinragt, zum Südpol – und umgekehrt. Damit nach Beendigung der Messung kein Magnetismus im Kern zurückbleibt (der die nächste Messung stören würde), muß diese aus sehr weichem Eisen bestehen.

Bei Wechselstrommessungen ändern die Spule und damit auch der Kern 100mal in der Sekunde ihre Polarität (bei Netzfrequenz von 50 Hertz); das stört nicht, weil der Kern das ja immer sofort mitmacht. Vergrößerungen des Meßbereichs sind bei Gleichstrom in der Art wie beim Drehspul-Meßgerät möglich – mit Vor- und Nebenschluß-Widerständen. Bei Wechselstrom geht das nicht, weil dieser sich in verschiedenen Spulen ganz verschieden benimmt. Zu dem einfachen elektrischen Widerstand kommt ein weiterer durch die „Selbstinduktion“ hinzu; wir kommen auch darauf noch zu sprechen. Jedenfalls müssen wir in solchen Fällen weitere Spulen mit entsprechenden Wicklungen bauen – die Praxis macht das auch.



Weicheisen-Meßgeräte mit Flach- beziehungsweise Rundspulmeßwerk und Luftdämpfung

Beim Eichen eines Weicheisen-Meßgeräts macht sich das verschiedene Verhalten von Gleichstrom und Wechselstrom in einer Spule schon bemerkbar; wir erhalten zwei verschiedene Skalen. Die Geräte der Praxis mit mehreren fest eingebauten Meßbereichen haben eine einmal, höchstens zweimal unterteilte Wicklung der Feldspule; das ist der einzige, recht beschränkte Ausweg, wenn man die (besseren, aber teureren) auswechselbaren Feldspulen vermeiden will.

Spannung unter der Lupe

Was doch „Spannung“ alles bedeuten kann! Da gehen wir mit Spannung in ein Kino, um einen „mit Spannung geladenen“ Film anzusehen. Ist der Film wirklich spannend, so bleibt unsere Spannung bis zum Schluß erhalten. Ist er langweilig, so fällt unsere Spannung bald auf den Nullpunkt: Wir stellen einen Spannungsabfall fest.

Spannung, Strom und Widerstand

Wir wollen bei unserer elektrischen Spannung bleiben, die in Volt gemessen wird und die der Physiker mit U bezeichnet (Abkürzung von Ursprung = elektromotorische Kraft zum Unterschied von der Klemmenspannung, die tatsächlich zwischen den Polklemmen liegt). Bei der Reihenschaltung von Stromquellen addieren sich deren einzelne Spannungen.

Der Strom gehört dazu, vom Physiker mit I bezeichnet (Abkürzung von „Intensität“). $U \cdot I = P$, das heißt, das Produkt aus Spannung und Strom ergibt die elektrische Leistung P . Erzeugt eine Stromquelle den Strom I und kann dieser die Leistung P aufbringen, so ist die Spannung U als Quotient $U = P/I$ gegeben, also als Leistung, geteilt durch die Stromstärke.

Noch etwas ist uns bekannt: Die Leistung wird in Watt (W) gemessen – zu Ehren des englischen Erfinders James Watt (1736 bis 1819). Wird die Leistung 1 W durch die Stromstärke 1 A erzeugt, so wirkt eine Spannung von 1 V.

Georg Simon Ohm (1787 bis 1854), ein deutscher Physiker, hat 1826 das von ihm entdeckte und auch nach ihm benannte Naturgesetz bekanntgegeben: das Ohmsche Gesetz. Es gibt den Zusammenhang zwischen Spannung, Strom und elektrischem Widerstand des Leiters an. Bei gleichbleibendem Widerstand des Leiters ändert sich die Stromstärke verhältnis-

gleich mit der Spannung und bei gleichbleibender Spannung umgekehrt verhältnisgleich mit dem Widerstand. Wir alle kennen die Gleichungen:

$$U = R \cdot I \quad R = U/I \quad I = U/R.$$

Die Maßeinheit des elektrischen Widerstandes ist nach Ohm benannt worden. Kurzzeichen ist Ω (Omega), der letzte Buchstabe des griechischen Alphabets. Ein Widerstand hat den Wert 1 Ohm, wenn an seinen Enden die Spannung 1 V liegt und die Stromstärke dabei 1 A groß ist.

Wir bestätigen das Ohmsche Gesetz

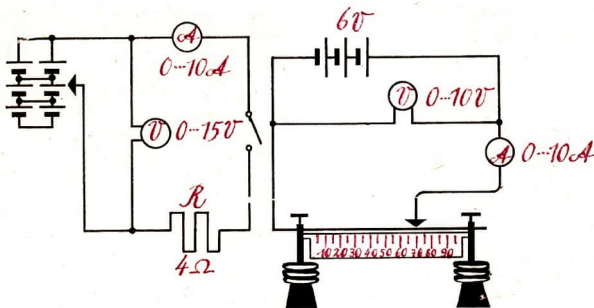
Wir nehmen als Spannungsquelle am besten einen Akkumulator mit drei Zellen (6 V), weil sein geringer innerer Widerstand die Messung nicht stört. Haben wir keinen, so schalten wir dreimal je zwei Taschenlampenbatterien parallel und diese drei Gruppen dann hintereinander, wie in der nebenstehenden Abbildung angegeben. Ferner sind nötig: 1 Spannungsmesser, 0 bis 10 V Meßbereich bei dem Akkumulator, 0 bis 15 V bei den Primärbatterien; 1 Strommesser 0 bis 10 A; 1 Widerstand, 2 beziehungsweise 4 Ohm; 1 Schalter.

Wir messen zunächst die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung. Der Reihe nach schalten wir eine Elementargruppe nach der anderen ein und lesen jeweils Spannung und Stromstärke ab. Die Werte tragen wir in eine Tafel ein, die etwa so aussieht:

Anzahl der Batteriegruppen	Spannung U in V	Stromstärke I in A	U/I (Widerstand R in Ohm)

Für die vierte Spalte teilen wir die zusammengehörenden Werte von U und I . Hier muß, wenn wir alles richtig gemacht haben, stets ungefähr der gleiche Wert auftreten – nämlich der Ohm-Betrag unseres Widerstandes. Am besten gelingt der Versuch, wie gesagt, mit einem mehrzelligen Akkumulator; im übrigen gibt es viele Möglichkeiten, den Versuch, beispielsweise durch andere Widerstandswerte, abzuändern.

Danach messen wir die Abhängigkeit der Stromstärke vom Widerstand. Als Widerstand können wir einen einfachen Gleitwiderstand benutzen, bei dem der bewegliche Kontakt über einen Widerstandsdraht gleitet, der auf einen keramischen Zylinder gewickelt ist (wir werden einen solchen bald bauen); besser in den Teilstrecken ablesbar ist ein straff zwischen zwei Klemmen gespannter Widerstandsdraht, 0,2 mm Durchmesser, 105 cm



Versuche zum Ohmschen Gesetz

lang, aus Konstantan, Nickelin, Manganin oder ähnlichem Material. Unter diesem Draht befestigen wir einen Pappstreifen oder ein linealartiges dünnes Brett, 100 cm lang und etwa 5 cm breit; wir zeichnen darauf eine Skale, etwa von 5 zu 5 cm unterteilt.

Den beweglichen Kontakt, etwa eine Krokodilklemme, legen wir zunächst so an den Draht, daß sein ganzer Widerstand wirksam wird (ganz rechts in der obenstehenden Abbildung). Wir lesen Spannung und Strom ab; die Spannungsquelle bleibt während dieses Versuches unverändert. Aus dem Quotienten U/I ergibt sich leicht der Widerstandswert des Drahtes. Wir verschieben nun den Gleitkontakt stufenweise nach links, bis die Stromstärke 10 A erreicht ist oder das letzte Stück des Widerstandsdrahtes zu warm wird. Die Stufen sollen alle gleich sein; wir können dann aus der Teilstrecke bequem den noch eingeschalteten Widerstandswert ausrechnen. Bei jeder neuen Stufe werden gemessen: Spannung, Stromstärke, Widerstand (mittelbar aus der Länge der Teilstrecke!). Wir benutzen wieder eine Zahlentafel.

Aus der Schaltzeichnung geht schon hervor, daß die Spannung unverändert bleibt; sie liegt ja unmittelbar an der Spannungsquelle. Es ist aber ein Be-

Spannung U in V	eingeschaltete Teilstrecke in cm	daraus berechnet Widerstand R in Ohm	Stromstärke I in A	$R \cdot I$ (Spannung in V)

weis dafür, daß wir richtig experimentiert haben, wenn die Spannung in der letzten Spalte auch rechnerisch wieder erscheint.

Das Ohmsche Gesetz gilt in dieser einfachen Form nur für Gleichstrom. Es hat für die Elektrotechnik eine große Bedeutung; mit seiner Hilfe kann man bei Entwürfen von Maschinen und Anlagen aus zwei bekannten Größen die dritte schnell errechnen. Das Ohmsche Gesetz ist unentbehrlich zum schnellen Bestimmen von Widerständen, beim Untersuchen von Störungen, beispielsweise Kurzschlüssen, und anderem mehr.

Wir teilen eine Spannung auf

Wir holen unsere Versuchsanordnung von der Seite 243 und ändern sie so um, wie die nebenstehende Abbildung zeigt. Das wird eine etwas ungewöhnliche Schaltung: Über dem Widerstandsdraht R, an dessen Klemmen A und B, liegen zwei Spannungsmesser. Sie sind miteinander verbunden, und von der Verbindungsstelle geht der bewegliche Leiter mit der Krokodilklemme K aus.

Solange K nicht irgendwo mit R verbunden ist, zeigen die hochohmigen Spannungsmesser falsch an, denn jedes Meßgerät ist für das andere ein Vorwiderstand, der den Meßbereich vergrößert. Der Strommesser dagegen zeigt den ganzen Versuch hindurch eine bestimmte Stromstärke an.

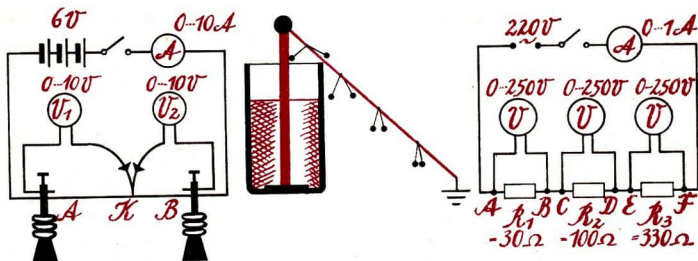
Verbinden wir K mit B, so zeigt V_1 die ganze Spannung U (hier 6 V) an. V_2 dagegen nichts. Die Spannung liegt noch voll und nicht unterteilt an V_1 . Verschieben wir K nach A zu, dann ist etwas sehr Wichtiges zu sehen: V_2 erhält immer mehr Spannung mit wachsendem Abstand B-K, und V_1 zeigt über dem schwindenden Stück A-K entsprechend weniger Spannung, nämlich U minus der Spannung über B-K. Beide Spannungsmesser zeigen zusammen stets die volle Spannung U an!

Spannungsteilung, Spannungsabfall

Offensichtlich ist die Spannung hier aufgeteilt worden, und wir haben auch gemerkt, wovon die Teilspannungen abhängen: vom „dazugehörenden“ Widerstand. Je größer der Widerstand, um so größer die Teilspannung. Die Stromstärke spielt eine ebensogroße Rolle; wird sie größer, steigt die Spannung, auch die Teilspannung. Das ist ja das Ohmsche Gesetz: $U = R \cdot I$! Legen wir 12 V statt der 6 V an, so verdoppelt sich die Stromstärke, und mit ihr verdoppeln sich die Teilspannungen.

Wenn K schließlich mit A verbunden ist, dann zeigt V_1 nichts, V_2 aber die volle Spannung U an; die Rollen sind vertauscht. Wenn mehrere Verbraucher (ein schlechtes Wort, denn der Strom wird gar nicht verbraucht, sondern fließt munter weiter im Kreise) so in einem Stromkreis liegen, nimmt also jeder sein „Stück Spannung“ für sich in Anspruch.

Daß die Spannung zwischen A und K immer kleiner wird, wenn wir mit K und A wandern, hat zu der Vorstellung geführt, die Spannung „fiele ab“



Spannungsaufteilung und echter Spannungsabfall

über die Widerstände hinweg, und zu jedem Widerstand gehöre (bei einem bestimmten Strom) ein bestimmter Spannungsabfall. Daher der Name! Uns scheint, der Name Teilspannung ist deutlicher, denn schließlich wird, wenn in einem Teil des Stromkreises die Spannung wirklich „abfällt“, die Spannung im anderen Teil um so größer.

Es gibt einen „echten“ Spannungsabfall in der statischen Elektrizität. Wir wollen uns einmal in die elektrostatische Abteilung unseres Labors begeben und einen Zwischenversuch machen, der eigentlich zur Lehre von der ruhenden Elektrizität gehört.

Ein „echter“ Spannungsabfall

Wir verbinden den Knopf einer Leidener Flasche über einen schräg gespannten, trockenen Bindfaden (nicht Seide!) mit der Erde (Tisch oder Fußboden). In gleichmäßigen Abständen bringen wir Paare von Holundermarkkügelchen an Leinenfäden oder doppelte Streifen aus Stanniol an, so wie wir das vom Elektroskop her kennen; es sind auch lauter einzelne Elektroskope auf dem Bindfaden. Laden wir die Leidener Flasche stark auf, so spreizt sich das oberste Elektroskop weit auseinander; bei den tieferen wird es immer weniger – und das letzte zeigt gar keine Spannung mehr. An dem Erdungspunkt ist unsere Spannung tatsächlich gleich Null; sie ist bis dorthin „abgefallen“. Das ist dank dem elektrischen Widerstand des Bindfadens allmählich geschehen. Die Ladung der Leidener Flasche, dieser Haufen überschüssiger und zielbewußter Elektronen, mußte den Weg durch den schlecht leitenden Bindfaden erst mühsam suchen; in der Nähe des Erdungspunktes wurde es immer leichter, und schließlich verschwanden die Elektronen ganz in der Erde – am Erdungspunkt war die Spannung gleich Null.

Hätten wir statt des Bindfadens einen leitenden Draht genommen, dann – nun, das wissen wir längst. Haben wir über den Bindfaden eine Spannung

gegen Erde, dann können wir eindeutig von Spannungsabfall reden. Aber die Tradition ist mächtig, und wir müssen wissen, daß man auch davon spricht, wenn die Spannung nur aufgeteilt ist.

Spannungsaufteilung in Gedanken

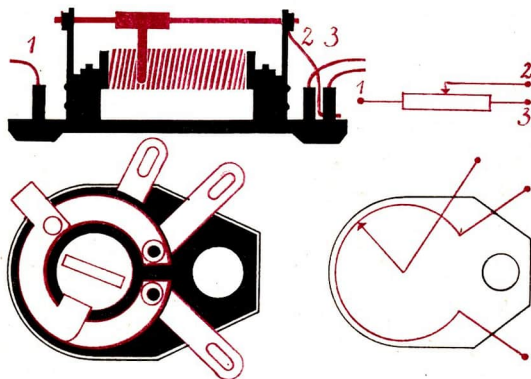
Wir müssen den Versuch in Gedanken machen, weil wir nicht mit der Netzspannung experimentieren dürfen (und es auch nicht wollen). Wir denken uns einen Stromkreis, wie ihn die umstehende Abbildung zeigt, mit drei verschiedenen großen Widerständen: $R_1 = 10 \text{ Ohm}$, $R_2 = 100 \text{ Ohm}$ und $R_3 = 330 \text{ Ohm}$. Welche Teilspannungen gehören zu den einzelnen Widerständen? Welche Stromstärke zeigt der Strommesser an? Mit Hilfe unserer Erlebnisse und des Ohmschen Gesetzes werden wir das schon herausbekommen.

Wir bauen einen Spannungsteiler

Die Gleichspannung läßt sich leider nicht so bequem wie die Wechselspannung „umspannen“; man kann sie im Labor nur auf die genannte Weise unterteilen. Das genügt aber meistens; auch in der Hochfrequenztechnik benutzt man Spannungsteiler, die man mit dem schlecht gebildeten Wort Potentiometer bezeichnet. Wir wollen einen einfachen Spannungsteiler bauen, wie ihn die Abbildung auf dieser Seite zeigt.

Der Widerstandsdraht kann auf einem Keramikzylinder mit Wendelnut blank eingelegt werden. Haben wir nun einen glatten Zylinder, so wickeln

Spannungsteiler



wir isolierten Draht auf und entfernen an beiden Längsseiten (durch Abbrennen und sehr vorsichtiges Schaben) einen Streifen der Isolation, damit der Gleitkontakt den blanken Draht findet. Der Widerstandsdraht darf nicht angekratzt werden, weil er an der Stelle einen größeren Widerstand (durch kleineren Querschnitt) bekommt. Wie lang und wie dick wir den Querschnitt nehmen, hängt davon ab, was wir mit dem Gerät vorhaben; die nachstehende Zahlentafel gibt Auskunft.

Durchmesser in mm	Konstantendraht WM 50		Nickelindraht	
	Widerstand je m in Ohm	dauernd belastbar mit Stromstärke in A	Widerstand je m in Ohm	dauernd belastbar mit Stromstärke in A
0,1	63,7	0,077	57,0	0,1
0,2	15,9	0,24	14,3	0,3
0,3	7,07	0,47	6,3	0,6
0,4	3,98	0,76	3,3	0,9
0,5	2,55	1,1	2,3	1,2
0,6	1,77	1,5	1,6	1,6
0,7	1,30	1,9	1,17	2,0
0,8	0,995	2,4	0,89	2,5
0,9	0,786	2,9	0,71	3,0
1,0	0,637	3,5	0,57	3,5
1,1	0,526	4,1		
1,2	0,442	4,7		
1,4	0,325	6,2		
1,6	0,249	7,6		
1,8	0,196	9,3		
2,0	0,159	11,1	0,14	10,0

*Widerstand und Belastbarkeit von Widerstandsdrähten
(Sie sind kurzzeitig mit der dreifachen Stromstärke belastbar)*

Der Gleitkontakt läßt sich straff auf einem Messingstab bewegen; der Stab wird an zwei Messingstreifen befestigt, von denen der eine mit der Buchse 2 verbunden wird (siehe nebenstehende Abbildung). Die beiden Enden der Spulen führen zu den Buchsen 1 und 3. Der keramische Zylinder wird mit einem hindurchgesteckten Metallstreifen an beiden Enden auf je einem Holzklötzchen festgeschraubt.

Wollen wir dieses Gerät als Spannungsteiler benutzen, so legen wir die Buchsen 1 und 2 an die Spannungsquelle; zwischen den Buchsen 1 und 3 sowie 2 und 3 können wir die Teilspannungen abgreifen. Die Abbildung auf Seite 246 unten zeigt einen Spannungsteiler industrieller Fertigung als Ansicht und schematisch dargestellt. Als einfacher Vorschaltwiderstand wird das Gerät mit den Buchsen 1 und 3 oder 2 und 3 in den Stromkreis geschaltet.

Spannung geht verloren

Die elektrische Energie läßt sich leicht und schnell überallhin befördern. Überlandleitungen mit Höchstspannungen (zur Zeit bis 750 000 V; der Blitz hat 100 000 000 V!) versorgen auch den entferntesten Abnehmer mit elektrischem Strom. In Fernmeldekabeln und -freileitungen fließen die Sprech- und Telegrafenströme.

Leider haben auch gutleitende Kupferdrähte immer noch einen elektrischen Widerstand: 1 m Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt hat 0,016 Ohm; auf 100 m sind das schon 1,6 Ohm. Bei Aluminium sind die Werte fast doppelt so hoch. Legen wir an einem Ende 220 V an die Leitung, so ist die Spannung am anderen Ende geringer; der Draht hat seinen Widerstand, der „Verbraucher“ am Endpunkt auch – und nun teilt sich die Spannung in der uns bekannten Weise auf! Wir „Verbraucher“ können also in einigen Kilometern Entfernung unsere Geräte nicht mehr voll betreiben.

Was ist zu tun? Eine höhere Spannung an die Leitung legen? Geht nicht, weil andere „Verbraucher“ näher an der Zentrale liegen und dann eine zu hohe Spannung bekämen. Dickere Drähte nehmen? Vom zu großen Gewicht abgesehen, ginge das technisch. Aber es ist zu kostspielig.

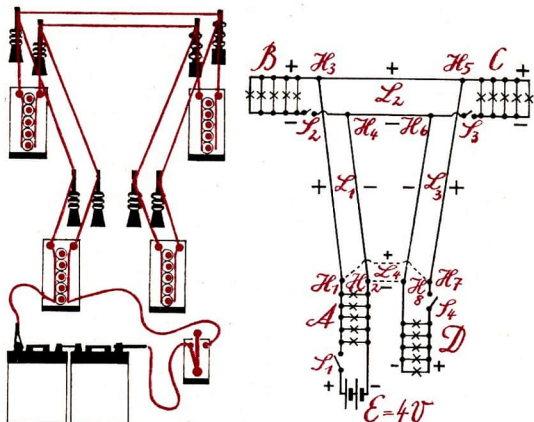
Es gibt einen Ausweg: Aus einer „langen Leitung“ macht man eine besondere Schaltung, eine *Ringleitung*.

Wir bauen eine „lange Leitung“ und eine Ringleitung

Wir wollen es auch auf die Gefahr hin tun, daß man uns sagt, wir hätten nachweisbar eine „lange Leitung“! Der Schaden wird bald ausgeglichen durch die Ringleitung. Die folgende Abbildung zeigt die Ansicht unserer Modellanlage. An Stelle der Masten sind „Holtzsche Klemmen“ benutzt worden, stehende Isolatoren mit schwerem Eisenfuß und Klemmleisten. Wer Lust und Zeit hat, kann auch Masten nach Originalen modellieren; Holz- und Metallbaukästen eignen sich gut dazu.

Nötig sind: 1 Batterie (E) (zweizelliger Akkumulator oder mehrere parallelgeschaltete Taschenlampenbatterien); 4 einfache Schwachstrom-Hebelschalter (S_1 bis S_4); 8 Holtzsche Klemmen (H_1 bis H_8) oder ähnliche Darstellungen der Masten; 20 Fassungen mit 20 Glühlämpchen 4 V, 0,3 A; 9 m isolierter Leitungsdraht mit geringem Querschnitt (bei Kupfer 0,4 mm, bei Aluminium 0,6 mm Durchmesser); 4 Holzbrettchen mit je 2 Anschlußklemmen für die 4 Lampengruppen zu je 5 Glühlampen; stärkerer isolierter Leitungsdraht für die Verbindungen innerhalb der Lampengruppen und von der Batterie zur ersten Gruppe.

Wir bauen zunächst das Modell der „langen Leitung“ nach der Schaltskizze auf Seite 249, ohne die gestrichelt gezeichnete Verbindung zwischen den „Verbrauchergruppen“ A und D. Mit dem Elektrizitätswerk E (unserer Akkumulatorenbatterie) werden nacheinander über die Leitungen L_1 , L_2 und L_3 die „Verbrauchergruppen“ (Stationen) B, C und D verbunden, die einzeln ausschaltbar sind. Die Gruppe A liegt unmittelbar an E. Die



Unser Modell einer „langen Leitung“ und einer Ringleitung

ganze Anlage ist von der Spannungsquelle durch den Schalter S_1 abschaltbar. Alle 20 (nebeneinandergeschalteten) Glühlampen werden eingesetzt und die Schalter S_2 , S_3 , S_4 und S_1 geschlossen. Ergebnis: Alle Glühlampen leuchten auf, die Gruppen C und D jedoch merklich dunkler als die Gruppe A. Wenn dieser Unterschied nicht deutlich genug sichtbar ist, müssen die Leitungen L_1 bis L_3 verlängert oder Drähte mit geringerem Querschnitt, das heißt größerem elektrischen Widerstand, verwendet werden. Diese Versuche werden zweckmäßigerweise im verdunkelten Raum durchgeführt.

Je weiter die „Verbrauchergruppe“ von der Batterie E entfernt ist, um so mehr sinkt die Helligkeit der Glühlampen ab. Die Helligkeit in der „Verbrauchergruppe“ D steigt, sobald die Gruppe C oder B oder beide ausgeschaltet werden.

Schalten wir in den vier Gruppen je vier Glühlampen ab (lockerdrehen), so leuchten die übrigbleibenden heller als vorher; die eine Glühlampe in D leuchtet jetzt ungefähr ebenso hell wie die Einzellampen in A, B und C.

Jetzt öffnen wir den Schalter S_1 und verbinden die Klemmen H_1 mit H_7 und H_2 mit H_8 . Damit ist die „lange Leitung“ in eine Ringleitung umgewandelt. Wenn wir den Schalter S_1 schließen, leuchten die Glühlampen in C und D wesentlich heller als beim Versuch 1; die Lichtstärke aller vier „Verbrauchergruppen“ zeigt nicht mehr so große Unterschiede.

Die Versuche zeigen im Modell verschiedene Aufgaben, die von der Elektrotechnik in der Praxis zu lösen sind. Im ersten Versuch sind die Folgen eines

zu großen Widerstandes der Leitungen sichtbar: Der Spannungsabfall in den Zuleitungen ist so groß, daß für die Elektrogeräte und Glühlampen am Ende der Leitungen die Spannung zu gering ist. Das ist um so mehr bemerkbar, je stärker unsere Anlage belastet ist, das heißt je mehr Glühlampen eingeschaltet sind. Der Spannungsabfall ist ja nicht nur vom Widerstand, sondern auch vom Strom abhängig ($U = I \cdot R$); das beweisen die folgenden Versuche.

Wird ein „Verbraucher“ von zwei Seiten, also über zwei verschiedene Leitungen, mit der Spannungsquelle verbunden, so ist die Wirkung die gleiche wie bei einer einzigen Leitung mit größerem Querschnitt (Summe beider Einzelquerschnitte) und demzufolge geringerem Widerstand. An Stelle von „Verbraucher“ sollte man besser „Benutzer“ sagen, denn der Strom wird nicht verbraucht, sondern benutzt.

Die Ringschaltung zeigt am Modell, daß diese Überlegung richtig ist. Die „Verbrauchergruppe“ C wird jetzt über zwei Leitungen mit Spannung versorgt, und die Glühlampen leuchten heller als vorher bei nur einer Zuleitung. Der Widerstand in den zwei nebeneinandergeschalteten Leitungen sinkt nach der Gleichung

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

und der Spannungsverlust wird geringer. Die Ringverbindung bietet noch einen weiteren Vorteil: Tritt in der einen Leitung ein Schaden (Unterbrechung) auf, so erhält der „Verbraucher“ noch über die zweite Leitung Spannung; eine solche Schaltung erhöht also die Betriebssicherheit.

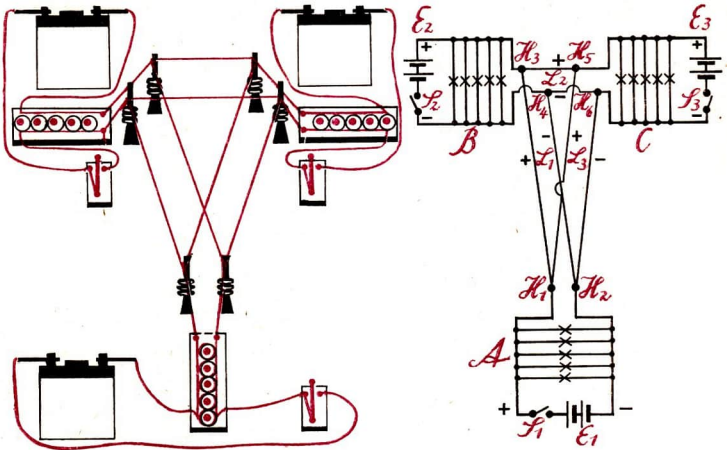
Wir schalten eine Ringleitung mit drei Spannungsquellen

Ringverbindungen in Stromversorgungsnetzen führen, wie der vorhergehende Versuch zeigte, zu wesentlichen Verbesserungen. Genügt diese Schaltart noch nicht – etwa weil der Strombedarf in den Hauptbelastungszeiten („Spitzenzeiten“) zu sehr ansteigt –, so schaltet man zwei oder mehr Spannungsquellen nebeneinander. Man sagt dann, die Elektrizitätswerke „fahren parallel“ im *Verbundbetrieb*.

Zusätzlich zu den Dingen des vorhergegangenen Versuches brauchen wir zwei weitere Batterien, sonst nichts. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Ansicht unseres Modells einer Ringleitung (Verbundsystem).

Nach der Schaltung entsprechend der Abbildung auf Seite 251 stellen wir die Ringleitung aus drei Spannungsquellen und drei „Verbrauchergruppen“ zusammen. Dabei ist zu beachten, daß alle Akkumulatoren nebeneinandergeschaltet, daß also alle positiven Pole und alle negativen Pole untereinander verbunden werden müssen. Die drei Schalter bleiben zunächst offen, in jeder „Verbrauchergruppe“ wird nur eine einzige Glühlampe angeschlossen (fest eingeschraubt).

Wir schließen zuerst den Schalter S_1 . Ergebnis: In A, B und C leuchten insgesamt drei Glühlampen hell auf.



Drei parallelgeschaltete Spannungsquellen speisen im Verbund eine Ringleitung

In den drei „Verbrauchergruppen“ werden dann je zwei weitere Glühlampen festgeschraubt, so daß jetzt insgesamt neun Lampen angeschlossen sind. Ergebnis: Die neun Glühlampen brennen dunkler als vorher die drei. Wir schließen nun den Schalter \mathcal{S}_2 . Die neun Glühlampen leuchten wieder heller.

Die letzten sechs Glühlampen werden festgeschraubt, so daß nunmehr alle fünfzehn Lampen angeschlossen sind. Die Lichtstärke sinkt wieder.

Wir schließen den Schalter \mathcal{S}_3 und beobachten, wie die Glühlampen wieder heller werden.

Obwohl in diesem Versuch der Leitungswiderstand unverändert bleibt, nimmt der Spannungsverlust von A bis B und A bis C wegen der erhöhten Stromstärke zu.

Die Abhilfe erfolgt hier jedoch nicht durch Änderung an den Leitungen, sondern durch Zuschalten weiterer Spannungsquellen. Es ist dabei wesentlich, daß die verschiedenen Batterien an möglichst weit entfernten Punkten des Ringnetzes angeschlossen werden, also an den Stationen B und C.

Die drei nebeneinandergeschalteten Batterien bilden so eine einzige Spannungsquelle mit der dreifachen Leistung einer Einzelbatterie. Durch das Aufstellen der Batterien an den Endpunkten wirkt man den Spannungs-

verluten in den Leitungen mit Erfolg entgegen; denn die drei Stationen A, B und C stellen mit ihren Spannungsquellen E_1 , E_2 und E_3 in sich geschlossene Stromkreise dar. Die Leitungen L_1 , L_2 und L_3 sind nur dann stromdurchflossen, wenn nicht sämtliche Batterien eingeschaltet sind oder wenn die Leistungsfähigkeit einer Batterie nachläßt.

Der Versuch zeigt vor allem, daß die Stromversorgung von der Belastung eines Netzes durch die „Verbraucher“ abhängt. Bei schwacher Belastung (je eine Glühlampe in A, B, C) genügt eine einzige Batterie, bei steigendem Strombedarf (je drei Glühlampen in A, B, C) wird die zweite Batterie hinzugeschaltet, und bei „Spitzenlast“, dem größten Stromverbrauch (je fünf Glühlampen in A, B, C), werden die drei Batterien parallelgeschaltet.

Die Belastung eines Elektrizitätswerkes schwankt ständig und zeigt Höchst- und Tiefstwerte, die sowohl durch die Jahreszeiten als auch durch die Tageszeiten bedingt sind.

Unsere Elektrizitätswerke erzeugen im allgemeinen eine Leistung, die dem mittleren Bedarf entspricht. In den Zeiten geringster Belastung (nachts) laufen die Maschinen teilweise leer, während der Spitzenlastzeiten werden sie dagegen bis zur Höchstbelastung gefahren. Man muß daher versuchen, die stärksten Unterschiede, die von der Tageszeit und von der Jahreszeit abhängig sind, auszugleichen.

Dazu dienen unter anderem Nachtschichten in den Produktionsstätten, Pumpspeicherwerke, Aufheizen von Warmwasserspeichern während der Nacht. Behördliche Anordnungen und freiwillige Mithilfe verhindern, daß während der Spitzenzeiten elektrische Heizgeräte, Bügeleisen und andere Geräte mit hohem „Stromverbrauch“ benutzt werden; auch Einschränkungen in der Beleuchtung helfen verhindern, daß einzelne Netzteile wegen Überlastung der Spannungserzeuger abgeschaltet werden müssen.

Der elektrische Widerstand wird gemessen

Wir wissen nun schon viel vom elektrischen Widerstand, kennen auch seine Beziehungen zum Strom und zur Spannung – da ist der Wunsch verständlich, Widerstände selber messen zu können. Wir haben auch alles Zubehör im Labor; eine Batterie (ein dreizelliger Akkumulator, 6 V, oder einige parallelgeschaltete Taschenlampenbatterien, 4,5 V), ein empfindliches Galvanoskop oder Galvanometer, einen Widerstandsdraht, einen Schalter, isolierte Leitungsdrähte und eine Krokodilklemme. Ja, und die Widerstände! Unbekannte, die wir messen wollen, und einige von bekannter Größe, mit denen wir unsere Unbekannten vergleichen müssen – denn darauf läuft es hinaus.

Geeichte Widerstände kann man in einzelnen Größen (ein „Normal“) und auch in Dekaden zusammengeschaltet haben, beispielsweise $10 \cdot 0,1$ Ohm, $10 \cdot 1$ Ohm, $10 \cdot 10$ Ohm und $10 \cdot 100$ Ohm. Am Ende dieses Versuches wissen wir, wie man sich selber geeichte Widerstandseinheiten herstellen kann, ohne daß die dabei benutzten Vergleichseinheiten beeinträchtigt

werden; es ist also schon am einfachsten, man leiht sich die Einheiten für das Eichen.

Es ist hier wie bei jeder Frage des Meßbereiches: Wir dürfen niemals drauflosschalten. Immer müssen wir vorher sorgfältig überlegen, ob alle Größen auch zusammenpassen; wo genaue Werte fehlen, müssen wir schätzen. Bei genügender Erfahrung stellt sich ein gewisses Fingerspitzengefühl ein; aber das dauert einige Zeit.

Widerstände werden verglichen

Zunächst kommt eine Messung nach dem Vergleichsverfahren. Es ist einfach, setzt aber voraus, daß wir einen regelbaren Vorwiderstand (Gleitwiderstand) und einen veränderlichen (bekannten) Vergleichswiderstand haben – einen „Dekadenwiderstand“ oder Kurbelwiderstand, oder einige Widerstände verschiedener Größen, die wir zusammensetzen, also hintereinanderschalten können. Die Abbildung auf Seite 255 links zeigt die Schaltung. R_v ist der regelbare Vorwiderstand mit etwa 10 Ohm; U ist ein einpoliger Umschalter (man kann auch einfach umstecken). R_v ist zugleich Schutzwiderstand für den Fall, daß bei sehr kleinem Widerstand R_x , der zu messen ist, eine zu hohe Stromstärke hindurchgelassen wird. R_v muß während jeder Einzelmessung unverändert bleiben; er darf nur anders eingestellt werden, wenn ein neuer unbekannter Widerstand das erfordert. Grundsätzlich soll man darauf achten, daß die Meßgenauigkeit aller an einer Messung beteiligten Geräte annähernd gleich groß ist. Eine übergroße Genauigkeit eines Gerätes wird durch die geringere anderer wieder aufgehoben.

Die Größe des Vorwiderstandes richtet sich nach der Größe des zu messenden Widerstandes R_x und dem Meßbereich des Strommessers, kann also von Fall zu Fall verschieden sein. Während einer Einzelmessung muß aber der eingestellte Wert von R_v stets unverändert bleiben. Der unbekannte Widerstand R_x und der bekannte Widerstand R_D können durch den Umschalter U abwechselnd in den Stromkreis gelegt werden. Als Vergleichswiderstand eignet sich am besten ein Dekadenwiderstand (mit Stöpsel- oder Kurbelkontakten). Wir können auch bekannte Einzelwiderstände, beispielsweise in Büchsenform, benutzen. Hat der unbekannte Widerstand zum Beispiel (schätzungsweise) weniger als 60 Ohm, so verwenden wir den Meßbereich 0 bis 1 A unseres Strommessers; bei einem vermutlich höheren Widerstandswert schalten wir einen kleineren Meßbereich, etwa bis 0,1 A, ein. Übrigens brauchen wir hier gar kein geeichtes Meßgerät, denn es kommt uns nur darauf an, die Ausschläge zu vergleichen. Ein als Stromanzeiger (mit wenig Wicklungen dicken Drahtes) gewickeltes Galvanoskop tut es auch. Der Meßbereich muß allerdings stets beachtet werden!

Wir legen den Umschalter U in die Schaltstellung 1, schalten R_v auf vollen Widerstand und schließen den Schalter S. Mit R_v wird die Stromstärke so geregelt, daß der Strommesser einen gut ablesbaren Wert anzeigt, beispielsweise 0,3 oder 0,4 oder 0,5 A. Jetzt schätzen wir die Größenordnung

des unbekannten Widerstandes R_x ungefähr ein und schalten den bekannten Widerstand R_D auf den geschätzten Wert.

Wir legen bei unveränderter Stellung von R_V den Umschalter U auf die Stellung 2. Ergebnis: Der Strommesser zeigt höchstwahrscheinlich einen anderen Wert als vorher an (der gleiche Wert auf Anhieb wäre Zufall oder – höchste Schätzungskunst). Wir verändern daher R_D , bis der Strommesser den gleichen Ausschlag hat wie bei eingeschaltetem R_x .

Der Widerstand R_x ist nun genau so groß wie R_D ; denn nach dem Ohmschen Gesetz gehören bei gleicher Spannung zu gleichen Stromstärken auch gleiche Widerstände.

Bei dieser Messung wird vorausgesetzt, daß sich die Spannung nicht verändert. Zum Abschluß wird deshalb zur Kontrolle U kurz auf Stellung 1 zurückgeschaltet. Der Zeiger muß seine Stellung beibehalten; andernfalls ist die Messung ungültig und muß wiederholt werden.

Dieses Vergleichsverfahren hat den Vorzug, daß man dabei nicht umrechnen muß, sondern den gesuchten Widerstandswert bei R_D einfach ablesen kann.

Der Meßbereich 0 bis 1 A genügt bei einer Spannung von 6 V für Widerstände von 0,5 bis 60 Ohm (bei R_V bis 10 Ohm). Größere Widerstände (55 bis 600 Ohm) lassen sich mit dem Meßbereich 0 bis 0,1 A ermitteln.

Entscheidend ist, daß ein Strom $I = \frac{U}{R}$ fließt, der vom Strommesser oder

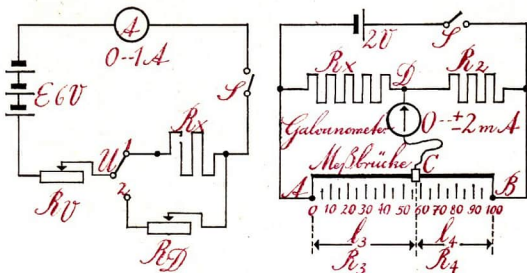
Galvanoskop noch gut sichtbar angezeigt wird. Bei sehr kleinen Meßwiderständen (0,5 bis 6 Ohm) muß R_V ganz oder teilweise eingeschaltet bleiben, damit die Stromstärke I im Bereich 0,1 bis 0,9 A bleibt. Niedrigere Spannungen als 6 V setzen den Größenbereich der Vergleichs- und Vorschaltwiderstände herab, höhere Spannungen erhöhen ihn; dieser Versuch kann daher in sehr vielen Variationen wiederholt werden.

Wir messen mit der Wheatstoneschen Meßbrücke

Sie ist nach dem englischen Physiker Sir Charles Wheatstone (ausgesprochen: Wietstohn; 1802 bis 1875) benannt worden. Dieses Verfahren ist das bekannteste und am meisten verbreitete. Als Spannungsquelle brauchen wir nur 2 V, also eine Akkumulatorzelle oder auch eine starke einzellige (runde) Taschenlampenbatterie (1,5 V). Die Meßbrücke haben wir schon (und wußten es nicht einmal) – es ist der Widerstandsdraht mit Skale und Gleitkontakt vom Versuch mit den Teilspannungen, Seite 243. Ferner sind nötig: ein empfindliches Galvanoskop oder Galvanometer, unsere bekannten und unbekannten Widerstände sowie der Schalter S.

Die Abbildung auf Seite 255 rechts zeigt die Schaltung der Meßbrücke. Wir stellen die Versuchsanordnung danach zusammen.

R_x ist der unbekannte Widerstand einer Spule, der gemessen werden soll, R_2 ein bekannter Widerstand (Dekadenwiderstand, Kurbelwiderstand). Je weniger R_x und R_2 sich voneinander unterscheiden, desto genauer kann



Schaltungen zur Widerstandsmessung

dann in der Mitte der Meßbrücke gemessen werden. Die Größenordnung von R_x muß geschätzt werden.

Der Gleitkontakt C teilt den Meßdraht AB (Widerstandsdraht aus Manganin, Nickelin oder einer ähnlichen Legierung mit hohem elektrischem Widerstand) in die beiden Teillängen l_3 und l_4 und zugleich in die Teilwiderstände $AC = R_3$ und $CB = R_4$ auf.

Nun schließen wir den Schalter S. Der Gleitkontakt C wird auf dem Widerstandsdraht (Meßdraht) der Meßbrücke so lange hin- und herbewegt, bis das Galvanometer (Nullpunkt in der Mitte der Skale) keinen Ausschlag mehr zeigt und damit nachweist, daß kein Strom in der Leitung CD fließt. Der Dekadenwiderstand muß dabei so verändert werden, daß der Gleitkontakt möglichst in der Mitte der Meßbrücke zu stehen kommt. Wird statt des Galvanometers als Notbehelf eine Glühlampe möglichst geringer Spannung (etwa 1,3 V) benutzt, so sucht man den Mittelwert zwischen den beiden C-Stellungen, bei denen die Glühlampe (im verdunkelten Raum) gerade ganz verlöscht.

Wir öffnen den Schalter S und lesen am Gleitkontakt C die Werte von l_3 und l_4 auf der Skale der Meßbrücke ab. Bei stromloser Leitung CD besteht folgende Beziehung zwischen den vier Widerständen R_x , R_2 , R_3 und R_4 , die sich aus dem Ohmschen und dem Kirchhoffschen Gesetz ergibt:

$$R_x : R_2 = R_3 : R_4.$$

Von R_3 und R_4 brauchen wir nicht die absoluten Ohmzahlen, sondern nur ihr Verhältnis $R_3 : R_4$ zu kennen, um eine lösbare Gleichung mit einer Unbekannten (R_x) zu erhalten. Es genügt daher, die bei der Messung gefundenen Teillängen des Meßdrahtes l_3 und l_4 in cm oder mm für R_3 und R_4 einzusetzen, wenn der Draht – was vorausgesetzt wird – über seine ganze Länge gleichen Querschnitt A hat und homogen ist, das heißt an allen Stellen aus dem gleichen Werkstoff besteht. Da allgemein

$$R = \frac{\rho}{A} \cdot l \quad (\rho = \text{spezifischer Widerstand})$$

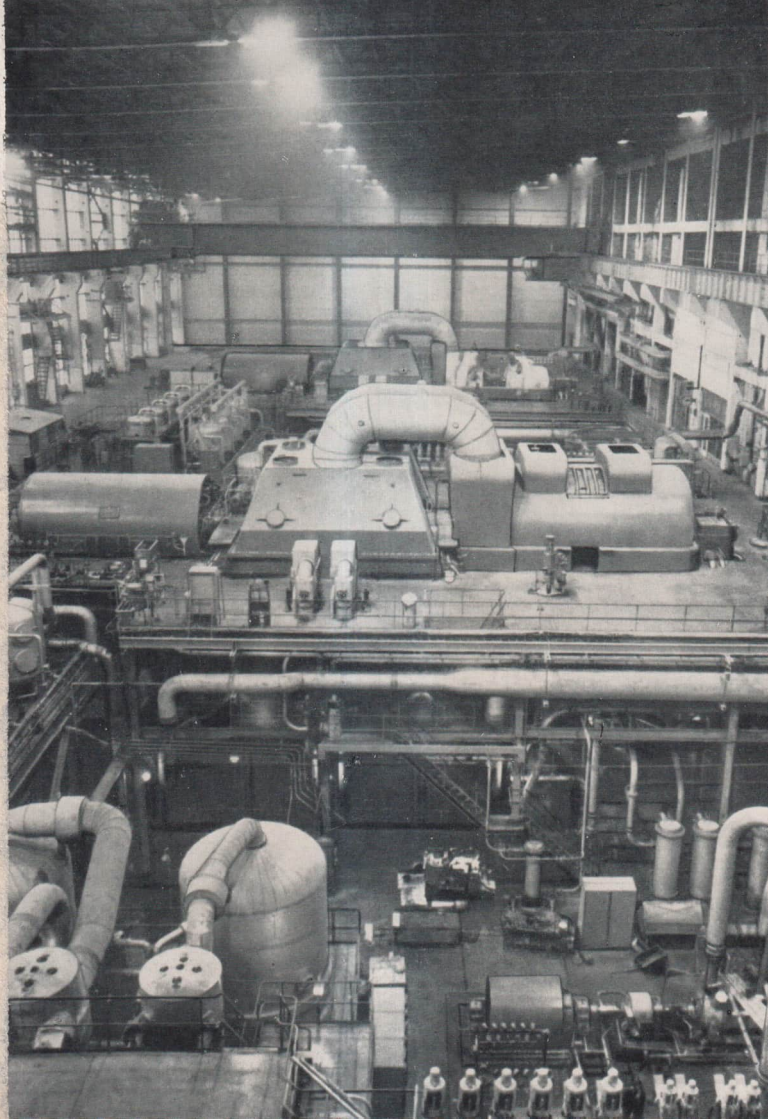
ist, ergibt sich nach Kürzen von ϱ und A

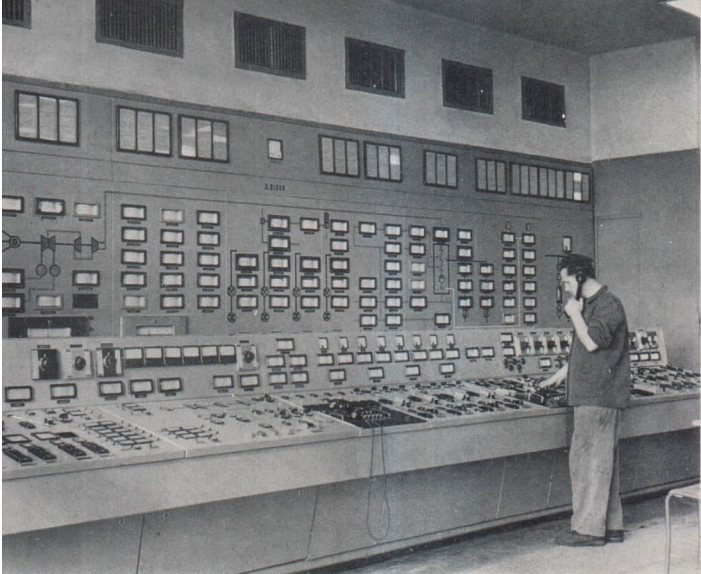
$$R_x : R_2 = \left(\frac{\varrho}{A} \cdot l_3 \right) : \left(\frac{\varrho}{A} \cdot l_4 \right) = l_3 : l_4.$$

Aus den drei gemessenen Größen R_2 , l_3 , l_4 wird die vierte, unbekannte R_x errechnet:

$$R_x = \frac{l_3}{l_4} \cdot R_2.$$

Wir setzen die gemessenen Werte in diese Gleichung ein und berechnen R_x .

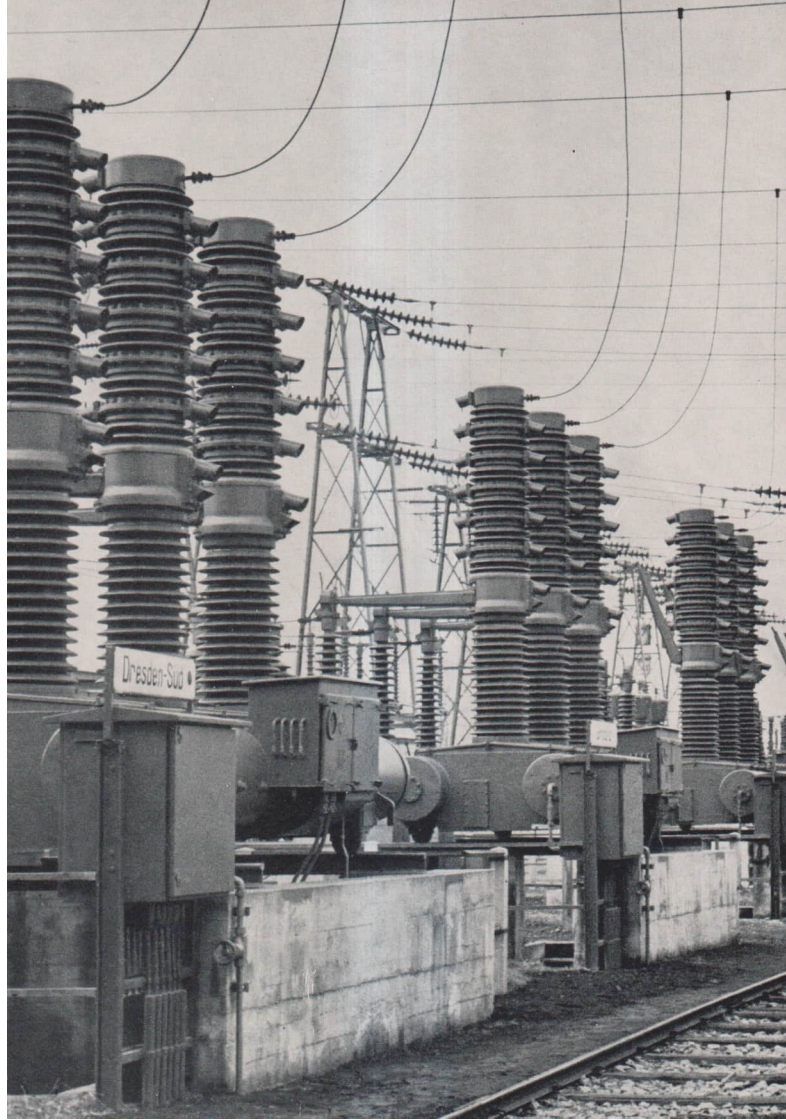


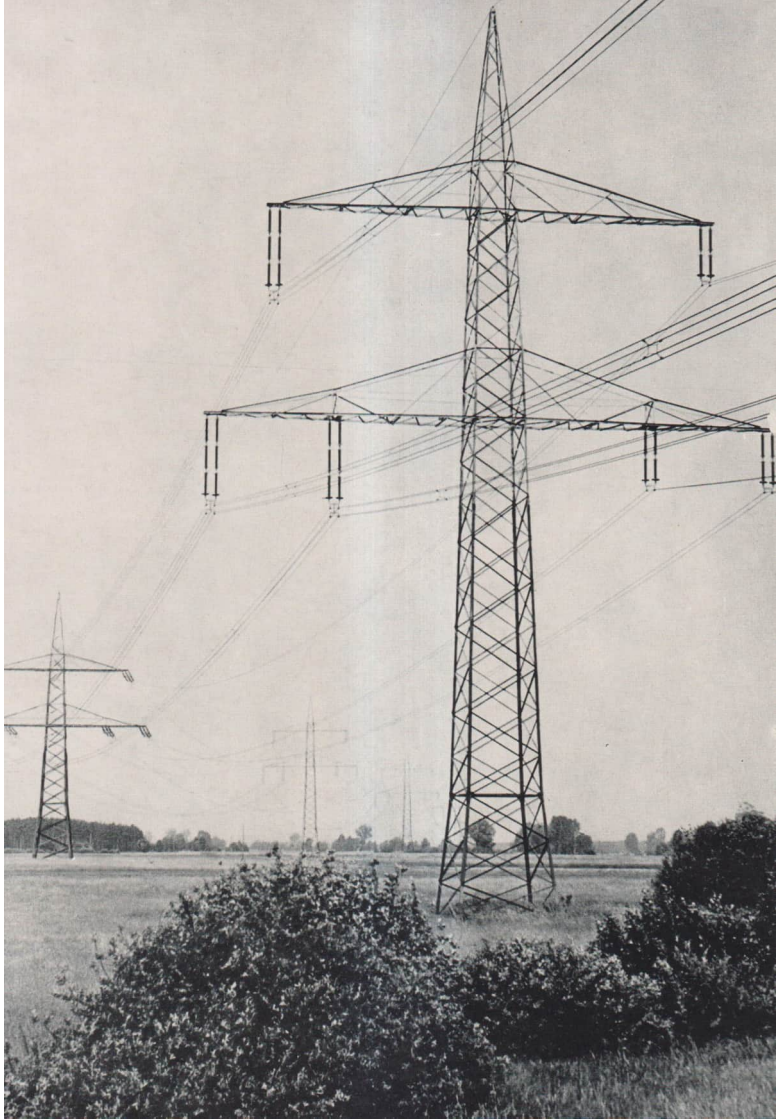


In der Schaltwarte wird der Lauf der Kraftwerksanlagen beobachtet und geregelt.

Das Kraftwerk speist den Strom über große Hochspannungsschalter in das Fern-
leitungsnetz ein. ►

◀ In unseren Kraftwerken wandeln moderne Turbogeneratoren die Energie des strömenden Dampfes in elektrische Energie um.





Elektrizität aus Bewegung

Die drei Wirkungen des elektrischen Stroms haben wir in eigenen Versuchen und Gedanken erlebt und die Geschichte ihrer Entdeckung nacherlebt: die chemische Wirkung, die Wärmewirkung und die magnetische Wirkung. Als wichtigste hat sich die magnetische erwiesen; ihre vielseitigen Anwendungen haben unser Weltbild erheblich verändert. Galvanis, Voltas und Oerstedts Entdeckungen haben der Gleichstromtechnik, vor allem der Fernmeldetechnik, den ersten großen Impuls gegeben; viele andere Forscher, nicht zuletzt Ampère und Ohm, trugen das Ihre dazu bei.

Durch die magnetische Wirkung konnte man Elektrizität in Bewegung verwandeln; man wußte, daß jeder stromführende Leiter ein Magnetfeld um sich bildet und daß dieses Feld auf jedes benachbarte Magnetfeld einwirkt – sei es das Feld eines natürlichen Magneten oder das eines anderen stromführenden Leiters. Polarität, Anziehung und Abstoßung – alles stimmte.

Die Forschung geht unaufhaltsam vorwärts. Folgerichtig ergänzen und erweitern neue Erkenntnisse die vorhergehenden. Der nächste Gedanke lag sozusagen in der Luft: Wenn die magnetischen Feldlinien so schön um einen stromführenden Leiter in einer bestimmten Richtung herumlaufen, dann müßte man doch einen Magnetpol mitlaufen lassen können! Und umgekehrt müßte man einen stromführenden Leiter um einen magnetischen Pol kreisen lassen können!

Faraday zeigt den Weg

Wenn eine neue Erkenntnis herangereift ist, dann ist auch immer mindestens einer da, der ihr ans Licht hilft. Diesmal war es der englische Chemiker und Physiker Michael Faraday (1791 bis 1867). Er war ein Mensch mit einer ungewöhnlichen Laufbahn; vom Buchbinderlehrling stieg er, der Sohn eines Grobschmiedes, zum Professor am Londoner „Royal Institution“,

dem „Königlichen Institut“ (Universität), auf. Als Buchbinderlehrling ohne gute Schulbildung las er alle Bücher, die er einbinden sollte, und erweiterte dadurch ständig sein Wissen – zum Kummer der Kunden, die entsprechend lange auf ihre gebundenen Bücher warten mußten.

Ein verständnisvoller Kunde freilich, der den wissensdurstigen Lehrling beobachtet hatte, schenkte ihm eine Eintrittskarte zu den Vorlesungen des berühmten englischen Chemikers Professor Humphrey Davy, des Begründers der Elektrochemie – den meisten Lesern sicherlich durch die „Davy-sche Sicherheitslampe“ (Grubenleuchte im Untertage-Bergbau) bekannt. Faraday wurde mit Davy, der aus ähnlichen sozialen Verhältnissen stammte, bekannt, wurde sein Mitarbeiter und später sein Nachfolger.

Faraday war ein Einzelgänger. Er war glücklich, wenn er experimentieren konnte; er hat es darin zu einer wahren Meisterschaft gebracht. Er hat auch viel über seine chemischen und physikalischen Versuche geschrieben – ohne auch nur eine einzige algebraische und chemische Gleichung zu verwenden. Trotzdem sind Faradays Schriften höchst wertvolle wissenschaftliche Quellen geworden, und sie sind mit großem pädagogischem Geschick, oft mit geradezu liebevoller Vertiefung in die Einzelheiten, geschrieben. Ein Musterbeispiel dafür ist seine kleine Schrift „Naturgeschichte einer Kerze“; sie zeigt die große Fähigkeit Faradays, Naturerscheinungen zu beobachten.

Faraday hatte einen „sechsten Sinn“ für die naturwissenschaftlichen Probleme, die „in der Luft lagen“, er hatte stets „Vorahnungen“. Dann pflegte er zu sagen: „Es könnte vielleicht so sein; versuche es!“ und experimentierte. Er wiederholte die Versuche Ampères und Aragos und ergänzte sie. Er bewies 1821 durch Experimente, daß (wie er in seinen Tagebüchern schrieb) „alle gewöhnlichen Anziehungen und Abstoßungen der Magnetnadel durch den leitenden Draht Täuschungen sind, daß die Bewegung nicht Anziehung und Abstoßung ist und nicht auf die Wirkung irgendwelcher anziehenden oder abstoßenden Kräfte zurückzuführen ist, sondern durch eine Kraft im Draht bewirkt wird, die sich bemüht, die Magnetnadel zu drehen, anstatt einen ihrer Pole dem Draht zu nähern oder zu entfernen. Daraus ergibt sich eine niemals endende kreisende Bewegung, solange die Batterie arbeitet. Es gelang mir nicht nur, das Vorhandensein dieser Bewegung theoretisch zu zeigen, sondern auch experimentell, und es ist mir gelungen, den Draht zur Drehung um einen magnetischen Pol zu bringen oder einen magnetischen Pol um den Draht“.

Das war der *erste Elektromotor der Welt*, mit Gleichstrom aus einer Voltaschen Batterie betrieben, durch die kreisenden magnetischen Feldlinien in die Bewegung gesetzt und gehalten: ein Unipolar-Motor, weil in seiner Mitte nur einer der beiden Magnetpole wirksam ist. Freilich, Kraft abgeben kann er praktisch nicht; er ist noch ein physikalisches Gerät und keine technische Maschine.

Es ist recht reizvoll, diesen Faradayschen Versuch einmal selber zu machen, wenn er auch einige Bastelarbeit erfordert. Um mit Faraday zu sprechen: Try it! Versuchen wir es!

Wir bauen den Elektro-„Urmotor“

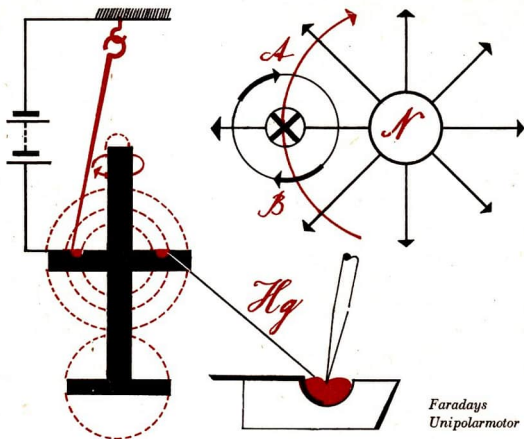
Wir brauchen außer unserer parallelgeschalteten Batterie oder dem Akkumulator einen recht langen und kräftigen Stabmagneten; zwei Anschlußklemmen; einen starken, blanken Kupfer- oder Aluminiumdraht, 25 bis 40 cm lang, 1 bis 1,5 mm Durchmesser; einen Ring aus Holz oder Gips, etwa 5 cm Innendurchmesser, etwa 7 cm Außendurchmesser und etwa 2 cm hoch, mit einer ringsherum laufenden, eingeschnittenen oder eingegossenen Vertiefung (Rinne); Stativmaterial; einige ml (cm³) Quecksilber; Verbindungsdrähte.

Quecksilber ist giftig! Nicht mit den Fingern berühren! Offen stehendes Quecksilber verdunstet und vergiftet auf die Dauer die Luft; es muß daher nach dem Versuch sofort wieder in den Behälter zurückgeführt und gut verschlossen werden. Verschüttetes Quecksilber muß sorgfältig, beispielsweise mit blanken Stanniolschnitzeln, aufgenommen werden. Ein Aluminiumdraht aus unreinem Aluminium (mit Beimengungen anderer Metalle) verbindet sich schnell mit dem Quecksilber, er „amalgamiert“. Daher möglichst reines Aluminium nehmen!

Die umstehende Abbildung zeigt den Aufbau der Versuchsteile. In der Mitte steht senkrecht der Stabmagnet (zweckmäßigerweise in ein Grundbrett eingelassen). In halber Höhe umgibt ihn die Rinne, die mit Quecksilber gefüllt ist. Oben an der Stativklemme sitzt ein Rundhaken oder eine Öse (sehr gut aus starkem Kupferdraht herzustellen). An diesem Haken oder an dieser Öse hängt der oben umgebogene starke Kupfer- oder Aluminiumdraht ganz locker und genau mitten über dem Magneten, also zugleich über dem Mittelpunkt des Ringes mit der Quecksilberrinne. Das andere Ende des Drahtes (oder Stabes) muß gerade eben das Quecksilber berühren und dabei leicht um den Magneten fahren können. Am besten spitzt man den Metallstab unten an; er soll mit dem Quecksilber einen guten elektrischen Kontakt, aber möglichst wenig mechanische Reibung haben. Oben an der Aufhängestelle ist auch ein guter Kontakt notwendig; Öse und Stab müssen da sehr blank sein. In das Quecksilber tauchen wir irgendwo am äußeren Rand das blanke Ende eines Verbindungsdrahtes; dieser wird befestigt und zu der einen Anschlußklemme geführt. Die andere Klemme wird mit dem Haken beziehungsweise der Öse an der Stativklemme verbunden; das Stativ kann selber Leiter sein. Die Oberfläche des Quecksilbers muß blankgehalten werden.

Wir brauchen jetzt nur unsere parallelgeschalteten Taschenlampenbatterien (oder einen Akkumulator mit einem Vorwiderstand von einigen Ohm) an beide Klemmen zu legen, um eine verblüffende Erscheinung zu beobachten: Der hängende Stab läuft emsig – vielleicht gelegentlich am Quecksilber Funken gebend – um den Stabmagneten herum! Voraussetzung für das Gelingen dieses nicht ganz einfachen Versuches sind die guten Kontakte; außerdem braucht man dazu eine Stromstärke von 10 bis 15 A. Vielleicht findet der eine oder andere Leser noch die Möglichkeit, an der Aufhängestelle einen besseren Kontakt herzustellen als den durch bloße Berührung; da oben ist das eine heikle Stelle!





Faradays
Unipolarmotor

Der Stromlauf ist klar: Batterie, Stativ, Stab, Quecksilber, Verbindungsleitung, Batterie – oder umgekehrt. Von der Richtung des Stroms ist der Umlaufsinn des Stabes abhängig.

Wer keinen genügend starken Stabmagneten hat, muß die Historie ein wenig fälschen und einen Elektromagneten nehmen. Er stellt einen Weich-eisenstab senkrecht auf, der von einigen Lagen eines mittelstarken Kupferdrahtes umgeben ist. Dieser Elektromagnet wird einfach irgendwo in den Stromlauf eingeschaltet (in Reihe). Damit er den Strom nicht wesentlich schwächt, soll der Draht wenig elektrischen Widerstand haben, also nicht zu dünn sein.

Wer aber einen fertigen Elektromagneten mit genügend lang herausragen-dem Kern und mit einer hochohmigen Wicklung hat, der muß den ur-sprünglichen Stromlauf so lassen und seine Magnetspule getrennt an die Batterie legen. (Wir bekommen hier eine ganz kleine Vorahnung von zwei Hauptschaltarten unserer heutigen Motoren: „Hauptschluß“ und „Neben-schluß“.)

Wieso läuft nun aber der Stab um den Magneten? Die vorstehende Abbil-dung gibt die Antwort. Der Nordpol ist, ebenso wie Pol und Stromrichtung in der obenstehenden Abbildung, nur als Beispiel gewählt; wir können es auch anders versuchen! Das magnetische Feld setzt sich aus zwei Einzel-feldern zusammen: dem „Radialfeld“ des Magnetstabes mit den wie Radien (daher der Name) ausstrahlenden Feldlinien und dem hier im Uhrzeigersinn umlaufenden Feld des hängenden Stromleiters. Wo die Feldlinien (oder auch die Felder) gegeneinanderlaufen, schwächen sie einander. Hier ist das

„oben“ an der Stelle A der Fall. Bei B laufen die Feldlinien in derselben Richtung und werden stark. Bei B entsteht ein „Überdruck“, bei A ein „Unterdruck“, und diejenigen, die einander schwächen, werden weggedrückt.

Ob wir – jeder für sich – wohl entsprechende Feldlinienbilder für den Südpol (Feldlinien laufen vom Nordpol zum Südpol!) und für die andere Stromrichtung zeichnen können – noch drei Möglichkeiten?

Die Induktion

Das war aber erst der Anfang der – auch für uns wichtigen – Ergebnisse der Faradayschen Experimente. Faraday hatte auf Grund seines großen Wissens und seiner reichen Erfahrung ein sicheres Gefühl für die Dialektik des Naturgeschehens – von ihm bescheiden „Vorahnung“ genannt. Er sagte sich folgendes: Ebenso wie man Magnetismus durch Elektrizität erzeugen kann, müßte entsprechend Elektrizität durch Magnetismus erzeugt werden können. Faraday baute eine Anordnung, wie sie die nebenstehende Abbildung zeigt. Er beschreibt sie in seinem Tagebuch am 29. August 1831 folgendermaßen: „2. Ich hatte einen Ring aus weichem Rundeisen von $\frac{7}{8}$ Zoll Dicke und 6 Zoll äußerem Durchmesser, um dessen eine Hälfte ich viele Windungen Kupferdraht wickelte, die durch Zwirn und Kaliko voneinander isoliert waren. Es waren drei Drahtenden von je 24 Fuß Länge, die zu einem Draht verbunden oder als getrennte Stücke benutzt werden konnten. Versuche mit einer Batterie zeigten, daß jeder Draht vom anderen isoliert war. Ich werde diese Seite des Ringes A nennen. Auf die andere Seite, durch einen Zwischenraum getrennt, wurden zwei Enden Draht, deren Länge zusammen etwa 60 Fuß betrug, im gleichen Sinne wie zuvor gewickelt; diese Seite sei B.



*Der erste
Umspanner der
Welt, nach einer
Originalzeichnung
von Faraday*

3. Ich lud eine Batterie von 10 Paar Platten, jede 4 Zoll im Quadrat. Die Windungen auf der B-Seite wurden zu einer Spule zusammengeschlossen und ihre Enden durch einen Kupferdraht verbunden, der über eine 3 Fuß vom Eisenring entfernte Magnetonadel führte. Dann verband ich die Enden eines der Teile der A-Seite mit der Batterie; sofort zeigte sich eine merkwürdige Wirkung auf die Nadel. Sie oszillierte und kehrte schließlich in ihre ursprüngliche Lage zurück. Beim Trennen der Verbindung der A-Seite von der Batterie wieder eine Beunruhigung der Nadel.“

Als Erläuterung hierzu: 1 Zoll (inch) = 2,54 cm; 1 Fuß (foot) = 30,5 cm (genau: 30,48 cm); $\frac{7}{8}$ Zoll = 2,22 cm; 4 Zoll = 10,16 cm; 6 Zoll = 15,24 cm; 24 Fuß = 120 cm; oszillieren = hin- und herschwingen. Die Seite A nennen wir heute Primärschule, die Seite B die Sekundärschule.

Faraday hat mit diesem Gerät den ersten Umspanner (Transformator) der Welt gebaut und damit die physikalische Voraussetzung für den Aufbau eines großen Industriezweiges geschaffen. Die Versorgung mit elektrischer Energie, aber auch die moderne Fernmeldetechnik ist ohne Umspanner und ohne

die auf derselben Grundlage arbeitenden Übertrager nicht mehr denkbar. Faraday beobachtete bei seinem Induktionsversuch und den folgenden Versuchen, daß beim Schließen des Primär-Stromkreises in der Sekundärspule ein Stromstoß in der entgegengesetzten Richtung und beim Öffnen ein Stromstoß in gleicher Richtung wie im Primärstromkreis entstand. An Stelle der einfachen Magnetonadel benutzte er Galvanometer, an Stelle der ringförmigen Anordnung gerade Spulen mit und ohne Eisenkern.

Daß bei primärem Dauerstrom in der Sekundärspule gar kein Strom floß, war für Faraday zunächst eine erstaunliche Sache; dann dachte er daran, daß man mit einem Magneten und einem stromdurchflossenen Leiter, also aus Magnetismus und elektrischem Strom, eine mechanische Bewegung hervorrufen konnte; er dachte an die Bewegung der Schleife beim Oersted'schen Versuch und schließlich daran, daß er, Faraday, selber die erste umlaufende Bewegung eines Stromleiters erreicht hatte. Bewegung – das mußte die Lösung sein!

Faradays Sinn für die Dialektik des Naturgeschehens ließ ihn überlegen: Müßte man nicht entsprechend aus Bewegung und Magnetismus einen elektrischen Strom erzeugen können? Seiner Eigenart getreu machte er sich erneut ans Experimentieren.

Faraday nahm eine Spule („Schraubendraht“ nannte er sie) ohne Eisenkern und verband die Drahtenden mit seinem Galvanometer. Dazu holte er einen Stabmagneten von $\frac{3}{4}$ Zoll (= 1,9 cm) Durchmesser und 8,5 Zoll (= 21,6 cm) Länge. Was damit geschah, lesen wir bei Faraday selber nach: „Dieser Magnet wurde mit einem Ende in die Achse des Schraubendrahtes gestellt und, nachdem die Galvanometer-Nadel zur Ruhe gekommen war, plötzlich hineingeschoben. Augenblicklich wich die Nadel ab . . . blieb der Magnet darin, so nahm die Nadel wiederum ihre erste Stellung an; wurde er herausgezogen, so wich sie nach entgegengesetzter Richtung ab.“

Damit hatte Faraday das *elektrodynamische Prinzip* entdeckt, nach dem alle umlaufenden Stromerzeuger (Generatoren) arbeiten. Das war eine der größten Leistungen in der Geschichte der Menschheit. Die riesengroße Entwicklung der Starkstromtechnik setzte nach diesem Impuls ein. Rückwirkend wurde auch die Entwicklung der Fernmeldetechnik entscheidend gefördert; die Lichttechnik und viele andere technische Bereiche wurzeln in dieser Faradayschen Entdeckung, in diesem Naturgesetz, das Faraday entdeckt hat.

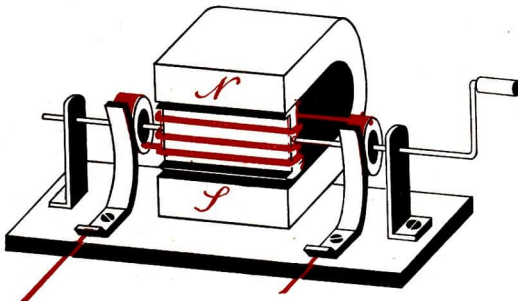
In einer Drahtspule, die ein Teil eines geschlossenen Stromkreises ist, entstehen Spannung und Strom dadurch, daß die (ruhenden) Windungen der Spule von (sich bewegenden) magnetischen Feldlinien „geschnitten“ werden. Dabei ist es gleich, ob die sich bewegenden Feldlinien durch Ein- und Ausschalten eines Stromes in einer benachbarten zweiten Spule (Primärspule) oder dadurch erzeugt werden, daß man ein gleichbleibendes magnetisches Kraftfeld mit seinen Feldlinien mechanisch durch die Spule, in der der Strom erzeugt werden soll, bewegt oder möglichst nahe an dieser entlangführt. Im ersten Fall baut sich das Kraftfeld der Primärspule auf und fällt dann wieder zusammen; die Feldlinien sind auch da in Bewegung. Und auf diese „relative Bewegung“ der Feldlinien zur festen Spule kommt

es ja an; sich bewegend müssen die Feldlinien die Spule „schneiden“. Durchdringen sie ruhend die Spule, so entsteht in dieser kein Strom. Im Falle der beiden Spulen sprechen wir von der *elektromagnetischen Induktion*. Sie wird beim Umspanner ausgenutzt. Bei dem sich mechanisch vor der Spule bewegend Magnet-Kraftfeld haben wir, wie schon erwähnt, das elektrodynamische Prinzip, angewendet in den heutigen Stromerzeugern (Generatoren, Dynamomaschinen).

Faraday hat erkannt, daß man mit der elektromagnetischen Induktion keinen gleichmäßigen Dauerstrom (Gleichstrom), sondern nur Stromstöße, Stromimpulse erhalten konnte, und wir wissen nun, warum es keine Umspanner für Gleichstrom geben kann! Faraday hat gefunden, daß die Stärke des in einem Leiter induktiv erzeugten Stroms der Anzahl der magnetischen Feldlinien entspricht, die den Leiter in der Zeiteinheit „schneiden“. Er hat beobachtet, daß die Stromrichtung in der Sekundärspule wechselt; damit hat er den ersten Wechselstrom erzeugt. Er wußte noch mehr:

Die in der Primärspule entstehenden und vergehenden Feldlinien „schneiden“ zwangsläufig auch die Windungen der eigenen (Primär-)Spule und erzeugen in ihr eine „Selbstinduktions-Spannung“. Beim Einschalten ist die Sekundärspannung und ebenso die Selbstinduktionsspannung stets dem Primärstrom entgegengesetzt gerichtet; der Primärstrom wird dadurch geschwächt. Das ist in der Elektrotechnik ein meist unerwünschter, aber unvermeidbarer Verlust. Gelegentlich (wie beispielsweise in der „Drosselspule“ an Gasentladungslampen) wird diese Erscheinung zum Drosseln des Stroms ausgenutzt.

Beim Ausschalten haben Sekundärspannung und Selbstinduktionsspannung folgerichtig die gleiche Richtung wie der Primärstrom. Das ist allemal peinlich, denn dadurch wird der Stromfluß auf unerwünschte Weise verlängert. Bei Stromunterbrechern (wie an elektrischen Klingeln und Funken-

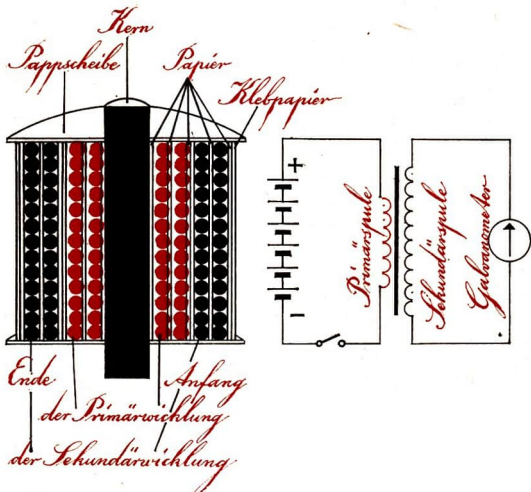


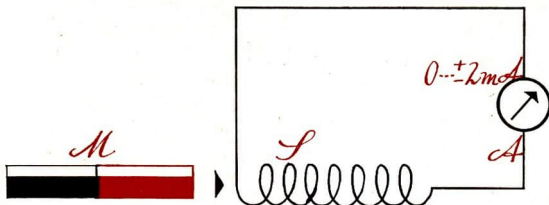
Der grundsätzliche Aufbau des Wechselstromerzeugers

induktoren) entstehen dadurch Funken, die die Kontakte mit der Zeit zerstören. Der „Nachstrom“ muß so schnell wie möglich unterbrochen werden. Diese Selbstinduktion hat Faraday also schon erkannt; Drosselspulen und Unterbrecher hatte er freilich noch nicht. Faraday hat außerdem begriffen, daß in der Sekundärspule zunächst eine (Sekundär-)Spannung entsteht; erst wenn der Sekundärstromkreis (beispielsweise durch das angeschaltete Galvanometer) geschlossen ist, entsteht auch ein Sekundärstrom. Daß die Stärke dieses Sekundärstroms von der Sekundärspannung und dem elektrischen Widerstand des Stromkreises abhängt, hat erst Ohm mit Hilfe vieler Experimente gefunden: das Ohmsche Gesetz, mit dem wir schon gearbeitet haben. Faraday hat aber schon erkannt, daß die Größe der Sekundärspannung im Verhältnis zur Primärspannung mit dem Verhältnis der Windungszahlen der Sekundärspule und der Primärspule zusammenhängt. Die genaue Proportion, das Gesetz: Die Größen der Spannungen verhalten sich zueinander wie die Windungszahlen – das konnte er allerdings noch nicht finden, weil ihm keine sinusförmigen Wechselströme zur Verfügung standen. Wir wollen nun selber Faradays Induktion nachprüfen.

Wir induzieren elektrische Spannung

Wir brauchen dazu unsere Batterie, zweimal einige Meter isolierten schwachen Kupferdraht (vom Elektromagneten einer Klingel etwa); ein Stück





Wir erzeugen Strom durch mechanische Bewegung

weiches Rundeisen, 10 bis 15 cm lang, 5 bis 15 mm Durchmesser, notfalls auch mit quadratischem Querschnitt, oder ein entsprechendes fest zusammengeschmürtes Bündel aus weichen Eisendrahtstücken (sogar besonders gut!) als „Kern“; unser Galvanoskop oder Galvanometer mit Nullpunkt in der Mitte, also Zeigerausschlag nach beiden Seiten; Pappe, Papier; Verbindungsdrähte; Stecker und Anschlußklemmen.

Wir müssen, auf Faradays Spuren wandelnd, zunächst die beiden Spulen wickeln. Über den Kern aus Weicheisen (niemals aus Stahl, denn der bliebe magnetisch!) kommt eine Lage Papier, auf diese werden zwei Pappscheiben als Begrenzung für die Wicklung aufgesetzt. Die eine Pappscheibe bekommt in Kernnähe ein kleines Loch; durch dieses stecken wir etwa 25 cm des ersten Drahtes als Anschlußleitung hindurch. Dann wickeln wir die ganze erste Drahtlänge von der ersten Pappscheibe bis zur zweiten schön sauber auf, Windung dicht neben Windung. Ist die erste Lage fertig, legen wir ein Stück Papier darüber und wickeln weiter, jetzt auf die erste Pappscheibe zu und so fort, bis der Draht zu Ende ist. Die letzten rund 25 cm werden durch ein Loch in der nächstgelegenen Pappscheibe als zweite Anschlußleitung gesteckt; die oberste Drahtlage wird durch Klebepapier oder ähnliches befestigt. Damit ist die Primärspule fertig.

Die Sekundärspule wickeln wir in gleicher Art mit dem zweiten Draht auf die Primärspule auf. Grundsätzlich können wir sie auch auf denselben Kern (wenn er lang genug ist) neben die Primärspule setzen; im allgemeinen hat man aber eine bessere Wirkung, wenn beide Spulen übereinander liegen. Wir schalten alles entsprechend der nebenstehenden Abbildung.

Beim Einschalten des Primärstroms schlägt der Zeiger unseres Galvanoskops nach der einen Seite aus und geht in die Ruhestellung zurück, während der Primärstrom noch fließt. Beim Ausschalten des Primärstroms schlägt der Zeiger nach der anderen Seite aus. Damit haben wir die Wirkungsweise der Umspanner nachgewiesen.

Wir erzeugen elektrischen Strom durch mechanische Bewegung

Dieser Versuch ist ebenfalls leicht und überzeugend. Nötig sind: eine Drahtspule mit vielen Windungen, ohne Kern; ein möglichst starker Stabmagnet, der leicht in die Spulenöffnung paßt; ein möglichst empfindliches Galvanoskop oder Galvanometer (mit Nullpunkt in der Mitte). Die Spule wird an das Galvanoskop angeschlossen. Wenn wir als Optimisten (wie alle Forscher) etwa ein behelfsmäßiges Galvanoskop aus Kompaß und Spule benutzen, müssen wir darauf achten, daß die Magnetnadel in Ruhelage genau parallel zur Spulenwicklung liegt; beim Beobachten während des Versuchs schauen wir nur auf ein und dieselbe Nadelspitze.

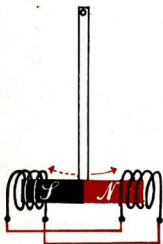
Wir stoßen den Stabmagneten mit einem Pol so schnell wie möglich mit seiner einen Hälfte (nicht weiter!) in die Spule und beobachten gleichzeitig den Ausschlag der Kompaßnadel oder des Galvanometerzeigers. Den Magneten lassen wir ruhig in der Spule liegen; der Zeiger geht auf Null, seine Ausgangsstellung, zurück. Jetzt ziehen wir den Magnetstab mit einem Ruck aus der Spule heraus: Der Zeiger schlägt nach der anderen Seite aus. Die Ausschläge sind um so größer, je schneller wir den Magneten bewegen. Wenn wir jetzt den Magnetstab umdrehen und den Versuch wiederholen, was beobachten wir dann? Das soll jeder inzwischen erfahrene Experimentator einmal selber herausfinden!

Der induzierte Strom bremst die Bewegung

Zum Bewegen des Stabmagneten in der Spule brauchen wir eine zusätzliche Kraft, um die dort entstandene magnetische Kraft zu überwinden; mechanische Energie wird in elektrische umgewandelt. Die Kraft ist so klein, daß wir sie in der Hand nicht spüren; ein Experiment kann den Widerstand dagegen sehr deutlich nachweisen. Wir befestigen einen etwa 20 cm langen Stabmagneten an einem Ende eines 1 m langen Pendelstabes, wie er in großen Standuhren verwendet wird. Der Pendelstab schwingt leicht um seine Aufhängung. Der Magnet liegt waagrecht und schwingt zwischen zwei Spulen mit je etwa 1200 Windungen; dabei taucht er mit seinen Enden abwechselnd in die eine und in die andere Spule ein.

Solange der Stromkreis in den Spulen offen ist, schwingt unser Magnetpendel ganz frei aus; ein Induktionsstrom kann nicht entstehen. Schalten wir jedoch beide Spulen parallel zueinander, so bremst der Induktionsstrom in beiden Spulen den Magneten sehr schnell. Sind die Spulen in Reihe geschaltet, so wird der Magnet nicht gebremst. Die Erklärung folgt im nächsten Abschnitt.

Damit haben wir die Wirkungsweise der modernen Stromerzeuger nachgewiesen und zugleich unsere Faradayschen Versuche abgeschlossen.



Einige Betrachtungen zu den Induktionsversuchen

Fr. Heusler hat 1903 entdeckt, daß nicht nur Eisen, sondern auch Legierungen anderer Metalle, beispielsweise eine aus Kupfer, Aluminium und Mangan, magnetisch werden können; sie zeigen dann in dieser Hinsicht die gleichen Eigenschaften wie das Eisen. Dieses bleibt das „Vorbild“; man spricht daher von Ferromagnetismus. Die Legierungen können ihn haben, wenn ihre Atome in ganz bestimmten Mengen miteinander verbunden sind; außerdem müssen sie in bestimmter Weise kristallisiert sein. Alle Magnete sind kristallisierte Stoffe.

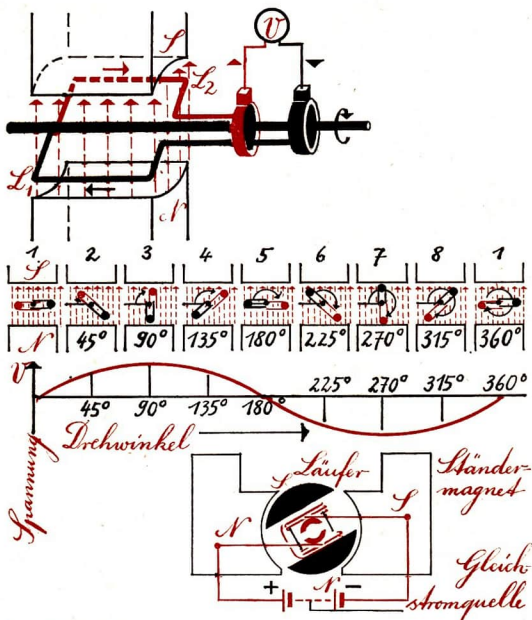
Der bekannte französische Physiker Pierre Curie (1859 bis 1906) fand, daß ein ferromagnetischer Körper bei einer bestimmten Temperatur, der „Curietemperatur“, seinen Magnetismus und seine Magnetisierbarkeit verliert; Eisen bei 768 °C, Nickel bei 360 °C, Stähle je nach ihrer Zusammensetzung zwischen 200 und 700 °C. Wir stellen uns das Innere eines Magneten so vor, daß er aus lauter winzigen Magnetchen, den *Elementarmagneten*, besteht; jeder von diesen hat seinen Nordpol, seinen Südpol und sein Magnetfeld. Zunächst sind die Elementarmagnete ungeordnet; ihre magnetischen Wirkungen heben sich gegenseitig auf und dringen nicht nach außen: Der Werkstoff, etwa Weicheisen, wirkt nicht als Magnet. Sind jedoch alle Elementarmagnete gleichgerichtet, so addieren sich ihre Wirkungen, und der ganze ferromagnetische Körper ist ein Magnet. Dieses „Gleichrichten“ kann man, wie wir wissen, durch ein anderes Magnetfeld erreichen, etwa durch Bestreichen eines Stahls mit einem Magneten oder dadurch, daß man ihn in eine stromdurchflossene Spule steckt.

Bei Stahl bleiben die Elementarmagnete dann gleichgerichtet, der Stahl bleibt also magnetisch; wir können hier eine innere Richtkraft annehmen. Bei Weicheisen ist diese nicht oder nicht genügend vorhanden, und die Elementarmagnete verteilen sich wieder ganz willkürlich, sobald die Richtkraft von außen aufhört. Daher ist Weicheisen wohl magnetisierbar, aber niemals ein Dauermagnet.

Bei ferromagnetischen Stoffen ist die magnetische Richtkraft stärker als die Molekularbewegung; die Moleküle richten sich brav „in Reih und Glied“ aus – wenn auch noch leise „molekularbewegt“. Wird die Körpertemperatur jedoch wesentlich höher, dann überwindet die Molekularbewegung die magnetische Richtkraft, und der Körper wird unmagnetisch. Deshalb entmagnetisiert man Stahl durch Erhitzen.

Ampère wußte, daß der elektrische Strom in einem Draht stets ein magnetisches Feld hat, das mit steigender Entfernung vom Draht immer schwächer wird. Er hat den Gedanken ausgesprochen, daß schon in den Molekülen elektrische Ströme (er nannte sie „Molekularströme“) wie in einer Spule fließen; dann erzeugt jeder dieser Molekularströme ein winziges magnetisches Feld. Also können die Elementarmagnete in bestimmten Stoffen molekulare Kreisströme sein!

So reizvoll diese Fragen sind, wir haben nicht Platz genug, sie hier einge-



So entsteht eine Wechselspannung

hender zu untersuchen. Uns geht es um die eine Erkenntnis: Elektrizität, also elektrischer Strom, und Magnetismus sind nicht voneinander zu trennen; sie gehören schon ihrer Natur nach zusammen. Deshalb konnten wir mit Strom Magnetismus und mit Magnetismus (und relativer Bewegung) Spannung und Strom erzeugen.

Wir haben damit festgestellt, daß ein Magnetfeld nur am stromdurchflossenen Leiter auftritt. Der Strom muß fließen, oder anders gesagt: Eine bewegte Ladung muß vorhanden sein. Die ruhenden (statischen) Ladungen unserer Versuche aus der Elektrostatik haben keine solchen magnetischen Felder.

Weiterhin haben wir gefunden, daß ein bewegtes, also von der Zeit abhängiges Magnetfeld in einem geschlossenen Stromkreis einen Strom induziert. Wenn die Feldlinien die Drähte mit ihren ruhenden, ausgeglichenen Ladungen durchschneiden, beeinflussen sie diese; sie scheuchen sie aus ihrer Ruhe

auf. Das ist eine elektrische Wirkung, und die muß eine elektrische Ursache haben. Es gibt nur eine Erklärung dafür: *Das bewegte* (zeitlich veränderliche) *Magnetfeld wird stets von einem elektrischen Feld begleitet*. Das ist der Zusammenhang, auf den es uns ankommt:

Die bewegten elektrischen Ladungen, die Ströme, erzeugen in ihrer Umgebung Magnetfelder mit geschlossenen magnetischen Feldlinien, und bewegte Magnete rufen in ihrer Umgebung elektrische Felder mit geschlossenen elektrischen Feldlinien hervor. Dabei stehen die magnetischen und die elektrischen Felder stets senkrecht aufeinander. Der Drehsinn der magnetischen Feldlinien ist uns durch die Korkenzieherregel bekannt; beim induzierten Ringstrom hilft uns die Lenzsche Regel: Die Wirkung eines Induktionsstroms ist dem Vorgang, der ihn verursacht, stets entgegengerichtet. Der Induktionsstrom ist so gerichtet, daß sein Magnetfeld der Änderung des induzierenden Feldes entgegenwirkt. So erklärt sich die Bremswirkung am Magnetpendel unseres Versuches. Führt der Nordpol *in* seine Spule, so entsteht am Spuleneingang durch den induzierten Strom ebenfalls ein Nordpol; beide stoßen einander ab. Noch mehr: Der aus der anderen Spule *herausgleitende* Südpol erzeugt an seinem Spulenende auch einen Nordpol, und dieser versucht, durch Anziehung den Pendelmagneten zurückzuhalten. In Reihe geschaltete Spulen heben einander in ihrer Wirkung auf.

Zum Schluß wollen wir im Zusammenhang mit dem Vorhergehenden einen „physikalischen Blick“ in eines der wichtigsten Gebiete der Technik tun: die Erzeugung von Wechselstrom. (Der Gleichstrom an den Maschinen ergibt sich einfach dadurch, daß der Wechselstrom durch einen Umschalter auf der Achse, dem Kommutator, immer im richtigen Augenblick umgeschaltet wird, so daß der Strom stets in derselben Richtung fließt.)

Je mehr magnetische Feldlinien in einer bestimmten Zeit von der umlaufenden Spule $L_1 L_2$ (des „Läufers“ oder „Rotors“) geschnitten werden, um so größer ist die induzierte Spannung. Die nebenstehende Abbildung zeigt die verschiedenen Spannungen bei den einzelnen, immer um 45° gedrehten Stellungen der Spule (des „Läufers“ oder „Rotors“). Eine schöne Sinuskurve ist hier entstanden. Auf dem Papier läßt sich das leicht zeichnen; in der Praxis ist die Kurve nicht ganz so glatt. Die Spule hat sich einmal um sich selbst gedreht, um 360° . Wir sprechen bei der Kurve von einer „Periode“; unser Netz liefert einen Strom von 50 Perioden je Sekunde (50 Hertz).

Der Elektromotor ist im Prinzip ebenso gebaut, nur schickt man in die Spule Strom, so daß sie ein eigenes Magnetfeld hat. Dieses wirkt auf das feste Magnetfeld des „Ständers“ (Stators) so ein, daß die Spule umläuft – entweder durch den sowieso umlaufenden Wechselstrom oder durch den Umschalter (Kommutator), der wieder rechtzeitig umpolt.



Licht und Strahlen



Der Weg des Lichtes

Ein Weiser überlegte eines Tages, welche physikalische Erscheinung auf der Erde wohl die für diesen Planeten und seine Bewohner wichtigste sei. Da er weise war, kam er zu dem einzig möglichen Ergebnis: Alle Erscheinungen sind wichtig, keine darf ausfallen, wenn unsere Welt weiterbestehen soll.

Dennoch hat der Mensch gerade das Licht und die ihm wesensverwandte Wärmestrahlung schon sehr früh besonders schätzen gelernt. Nach einer alten Sage hat Prometheus den Menschen das Feuer vom Himmel geholt, wofür ihn der erzürnte Zeus, der oberste Gott des Altertums, an den Kaukasus schmieden ließ. Prometheus ist uns heute ein Inbegriff selbstbewußter schöpferischer Menschenkraft. Die Beherrschung des Feuers war eine der allerersten Voraussetzungen für die kulturelle und technische Entwicklung des Menschen.

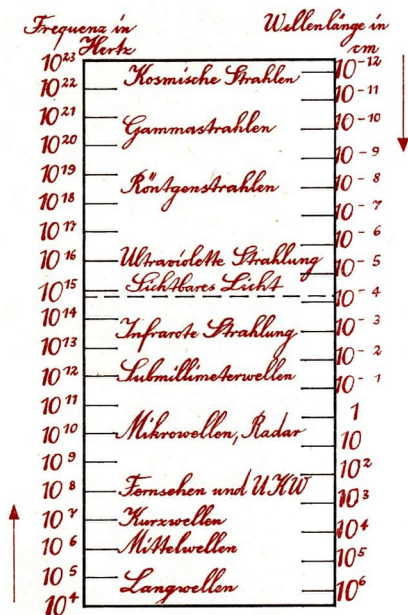
Der Mensch beginnt, das Licht zu erforschen

Entdeckungen und Experimente zeigten ziemlich früh, welchen Naturgesetzen das Licht gehorcht und wie es zum allgemeinen Nutzen verwendbar war. Heftig war dagegen der Streit um die Frage: *Woraus besteht das Licht?*

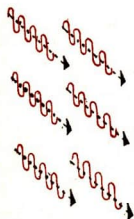
Auf den Gedanken eines „Lichtstoffes“ – der (falschen) Vorstellung des „Wärmestoffes“ entsprechend – kam man gar nicht erst; es war zu offensichtlich, daß sich Lichtstrahlen nicht kilogrammweise kaufen und aufbewahren ließen. Dieser Irrtum blieb bekanntlich den Schildbürgern vorbehalten, die ihr Rathaus ohne Fenster bauten; sie wollten die Räume mit Sonnenstrahlen erhellen, die in Säcken von draußen hereingeholt werden sollten. Dagegen verglich man das Licht bald mit Wasserwellen und Schallwellen; sollte sich Licht nicht durch ähnliche Wellen nach allen Seiten ausbreiten? Der holländische Physiker Christian Huygens (1629 bis 1695)

und andere angesehene Naturforscher setzten sich für diesen Gedanken ein; Experimente zur Überlagerung von Wellen bewiesen, daß er richtig war. Sofort erhob sich die nächste Frage: Welcher Stoff soll die Lichtwellen bilden? Zwischen Sonne und Erde war gewiß weder Wasser noch Luft. Der französische Physiker Augustin Jean Fresnel (1788 bis 1827, ausgesprochen Frenél) machte einen Vorschlag: Der Weltraum und alle Körper seien mit „Lichtäther“ angefüllt, und der bilde die Lichtwellen wie Wasser die Wasserwellen. Diese Theorie war falsch. Heinrich Hertz (1857 bis 1894) entdeckte das Richtige: das *elektromagnetische Feld*, das – wie der Name sagt – teils elektrisch, teils magnetisch ist. *Elektromagnetische Wellen* sind auch die Wärmestrahlen und noch andere Erscheinungen; die Tafel zeigt, daß

Bereiche der elektromagnetischen Schwingungen



*Doppelnatur
des Lichtstrahles*



sie sich alle nur durch ihre Schwingungszahl je Sekunde (Einheit 1 Hertz, Hz) und damit auch durch ihre Wellenlänge unterscheiden. Mit etwa 300 000 km je Sekunde bewegt sich das Licht; es ist immer irgendwohin in Bewegung.

Isaac Newton hatte Zweifel an der Wellenvorstellung des Lichtes. Er glaubte mehr daran, daß die Lichtstrahlen aus vielen, *sehr vielen kleinen Teilchen* bestehen, die mit der genannten Riesengeschwindigkeit von einem glühenden Körper fortgeschleudert werden; wir denken dabei an die Tropfenstrahlen eines Rasensprengers oder einer Sprühdose. Und das Erstaunliche geschah: Auch diese Theorie erwies sich als richtig; der Druck, den diese Teilchen, Lichtquanten (nach dem lateinischen *quantitas* = Menge, Anzahl) genannt, beim Auftreffen auf eine Fläche ausüben, konnte sogar gemessen werden! Also ist das Licht beides: Welle und Teilchen. Wir können uns diese „Doppelnatur“ so vorstellen, daß ein Teilchen die Form eines „Stückchens Welle“ hat. Jedenfalls hat unser Lichtstrahl, mit dem wir bald experimentieren wollen, zwei Gesichter; und je nachdem wie der Forscher sein Experiment aufbaut, sieht er bald das eine, bald das andere.

Wir wollen weiterhin einfach von „Lichtstrahl“ sprechen und trotzdem nicht ganz vergessen, welch merkwürdiges Ding das ist. Es läßt sich gut mit ihm experimentieren, denn er läuft immer schön geradeaus – bis wir ihn mit allerlei Tricks nach unserem Willen ablenken. Freilich reichen unser Wille und unsere Möglichkeiten nur so weit, wie das Naturgesetz der Lichtausbreitung es zuläßt; aber das wissen wir schon.

Experimente mit dem Licht

Sie sind ein wenig anders als die bisherigen in diesem Buch: Sie verlangen manchmal ein längeres Probieren und die nötige Geduld dazu (die jeder Forscher aufbringen muß). Dafür gibt es aber allemal viele verschiedene Möglichkeiten für uns, die Experimente aus Einzelteilen aufzubauen und zu basteln, kleine Änderungen im Versuchsaufbau führen oft zu verblüffenden, erfreulichen, neuen Ergebnissen. Der Lichtstrahl entwischt schnell, wenn wir nicht genau einstellen, eine saubere Bastelei vorher macht sich meist später durch Zeitersparnis bezahlt. Wir müssen vor allem immer wissen, was wir wollen und warum wir es so und nicht anders machen müssen. Die Erinnerung an einige Physikstunden in der Schule hilft gelegentlich auch.

Das allgemeine Material ist leicht zu beschaffen: Pappen, Pappröhren, etwa 2 mm dick und je nach Größe der Linsen mit einer lichten Weite bis 70 mm; Holzleisten; 2 Lineale, je 500 mm lang, aus Holz; federndes Metallblech; Sperrholz; lichtundurchlässiges (am besten schwarzes) Papier, Transparentpapier, weißes Papier; Streifen aus weichem Stoff, z. B. Schaumplast; Alleskleber, Knetmasse (Plastilin), Klebestreifen, Schnips-gummis; Nägel, Schrauben, Hammer, Zange, Raspel, Feile, Glasschneider und ein scharfes Messer (möglichst mit feststehender Klinge, etwa ein

Radiermesser), Rasierklinge. Dann das Gläserne, das bei einigem Glück in Läden für Augenoptik, Laborgeräte und Fotosachen zu finden ist: Glasplatten, Bechergläser, ein kleines Aquarium (mit 300 mm mal 160 mm Bodenfläche und möglichst glatten Glaswänden); Linsen (mit Brennweiten zwischen -12 und $+30$ cm, konvex und konkav, s. S. 298) und Spiegel (eben und konkav, Rasierspiegel, Hohlspiegel); spiegelblankes Haushaltsfolie aus Aluminium; Prismen, Uhrglasschalen; farbige Gläser und Folien gibt es in Glashandlungen für optisches Signalwesen. Holz- und Metallbaukästen sind sehr gut für unsere Zwecke zu verwenden.

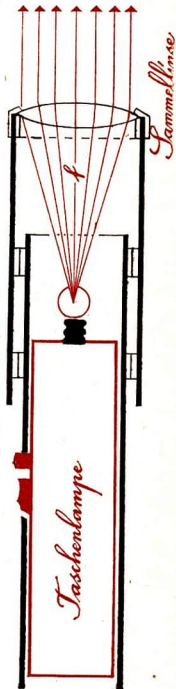


Ohne Lichtquelle geht es nicht

Die weitaus beste und billigste Lichtquelle ist die Sonne, die mit ihrem Licht und ihrer Wärme über 150 Millionen Kilometer hinweg alles Leben auf unserer Erde ermöglicht. Ihre Lichtstrahlen sind nicht nur sehr stark, sondern sie laufen bei uns – in der großen Entfernung! – auch so gut wie parallel; das ist für unsere Versuche recht wichtig. Sie beleuchten die Dinge auf der Erde so stark, daß von den Dingen genügend helle Strahlen ausgehen, die unsere Augen treffen; dann sehen wir die Dinge. Früher glaubte man eine Zeitlang, die Lichtstrahlen zum Sehen kämen aus unseren Augen. Das stimmt natürlich nicht – so praktisch es auch wäre, mit eigenem Augenlicht im Dunkeln sehen zu können! (Ein merkwürdiger Anblick wäre das: alle Menschen mit zwei Scheinwerfern im Kopf, durch die Lider und Wimpern abzublenden!) Der in der Sonne liegende Raum muß sehr gut verdunkelt werden (im Boden und Keller meist leicht möglich); die durch Loch oder Spalt einfallenden und meist im leichten Staub der Luft gut erkennbaren Sonnenstrahlen lassen sich durch Spiegel bequem in jede gewünschte Richtung lenken.

Bei trübem Wetter und nachts, wenn unsere Antipoden auf der anderen Seite der Erdkugel die Sonne zu Versuchen brauchen, benötigen wir eine eigene Lichtquelle. Die einfachste ist eine brennende Kerze; wir werden sie auch oft benutzen. Dann brauchen wir einen schmalen Lichtstrahl oder auch drei davon, die parallel laufen – wobei „ein Lichtstrahl“, selbst hergestellt, aus einer Riesenzahl physikalischer Strahlen besteht, die alle wieder parallel laufen. Wir nehmen die etwa 160 mm lange übliche Taschenlampe (mit zwei Stabelementen, Monozellen), die man durch Drehen des Leuchtkopfes auf Breitlicht oder schmales „Punktlicht“ einstellen kann. Wir nehmen den Reflektorkopf ab und umhüllen die Lampe mit einer etwa 140 mm langen Pappöhre, die 15 mm über die Glühlampe hinausragt; der Schalter liegt in einer Aussparung, in die er hineingeschoben wird. Zur Glühlampe hin ist die Röhre nicht aufgeschnitten; der Lampenkörper soll recht fest darin sitzen. Zu große Pappöhren werden mit Einsätzen aus enger geschnittenen Röhren ausgefüllt.

Eine zweite Pappöhre trägt an einem Ende die Sammellinse (5 oder 6 cm Brennweite, s. S. 299), mit Ringen und ausgeschnittenem Rohrdeckel befestigt. Sie muß lichtdicht über einige Pappringe gleiten, die auf der ersten





Röhre sitzen und deren Durchmesser so vergrößern, daß die zweite Röhre noch über den Schalter hinweggleitet. Wer statt der Taschenlampe ein durchbohrtes dickes Rundholz nimmt, am einen Ende die Glühlampe befestigt und die Leitungen nach außen zu einer Batterie oder einem Klingelumspanner führt, hat es leichter: Er setzt gleich die Pappröhre mit der Linse über das Rundholz. Der schöpferischen Phantasie sind keine Grenzen gesetzt. Die Röhren werden innen schwarz gestrichen, um schädliche Reflexe zu vermeiden. Unerwünschte „Lichtlöcher“ werden mit schwarzer Knetmasse abgedichtet.

Die Entfernung Glühfaden – Mitte der Linse ist durch die Brennweite f der Linse bestimmt: möglichst nicht über 5 oder 6 cm; sonst wird die Sache reichlich lang und unhandlich. Wichtig ist, daß der Glühfaden (der möglichst punktförmig sein soll) genau im Brennpunkt der Sammellinse sitzt, sonst kann man keine parallelen Lichtstrahlen ernten. Liegt der Glühfaden zwischen Brennpunkt und Linse, laufen die Strahlen draußen auseinander, ist er nach der anderen Seite – von der Linse weg – verschoben, laufen die Strahlen zusammen.

Vor der Linse wird die jeweilige Blende angebracht, die nur ein begrenztes Strahlenbündel durchlassen soll: Lochblende, Spaltblende oder Dreispaltenblende. Sie besteht aus einer runden Pappscheibe mit einem Ausschnitt in der Mitte, etwas größer als die Blende. Über den Ausschnitt klebt man festes, schwarzes Papier mit den Ausschnitten (mit Rasierklinge oder sehr scharfem, dünnem Messer hergestellt): Spalt je 1 mm breit und etwa 15 mm lang; Abstand der Spalten voneinander 1 bis 1,5 mm.

Man kann auch aus den dünnen Rasierklingen selbst gut einen Einzelspalt herstellen. Das runde Loch (1 bis 5 mm Durchmesser) wird am besten mit einer Lochzange oder einem Schlageisen ausgestanzt. Jede Blende erhält einen Pappring, der auf das Linsenende der Linsenröhre paßt. Haben wir eine Sammellinse mit einer ebenen Seite (eine plankonvexe Linse), so läßt sich die Blende auch leicht mit Klebefilmstreifen befestigen.

Wer es sehr eilig hat, nimmt die vollständige Taschenlampe, klebt die Lochblende mit Klebestreifen auf das Glas des Reflektors und befestigt vor dem Loch der Blende ein wassergefülltes und mit einem Stopfen sicher verschlossenes Reagenzglas, 20 bis 30 mm Durchmesser, Schnipsgummis, die am Griffende der Taschenlampe einen Halt finden, eignen sich sehr gut dazu. Diese „Zylinder-Wasserlinse“ entläßt einen schmalen und hohen Lichtstreifen, der sich gut für die Versuche eignet. Wer Kugeln gleicher Durchmesser aus klarem Glas hat, mag auch sie versuchen; man befestigt die Kugel mit Hilfe einer Pappröhre (in der sie sich verschieben läßt) vor der Blende.

Auch ein Hohlspiegel, der sich in einer Röhre mit Hilfe eines Stempels oder einer kleineren, einschiebbaren Röhre hin- und herbewegen läßt, ergibt mit einer kleinen Glühlampe eine Experimentalleuchte. Durch Verschieben des Hohlspiegels kann die in der äußeren Röhre befestigte Glühlampe in den Brennpunkt des Hohlspiegels gebracht werden.

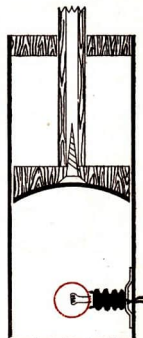
Ist der Glühfaden einigermaßen punktförmig und steht er genau im Brennpunkt, so ist mit einigermaßen parallelen Lichtstrahlen zu rechnen; störend



macht sich bei dieser Anordnung der Schatten von Glühlampe und Fassung bemerkbar (die man also recht klein halten soll). Am wenigsten stören zwei verdrehte, steife Kupfer-Leitungsdrähte, die an den Lampensockel angelötet sind und die Glühlampe zugleich tragen. Verschiebt man den Hohlspiegel, so laufen die Lichtstrahlen auseinander oder zusammen (s. S. 287).

Hat man Pappröhren nur einer einzigen lichten Weite, etwa 70 mm, und will man eine zweite hineinschieben, so muß diese der Länge nach aufgeschnitten, im Umfang verkürzt und mit dunklem Klebestreifen wieder zusammengeklebt werden. Um wieviel der Umfang verkürzt werden muß, ist – wie eine einfache geometrische Rechnung mit $2\pi r$ zeigt – nicht vom Durchmesser der Röhre, sondern von deren Dicke abhängig: Die Zahlen-tafel gibt die praktischen Werte (in mm) an, die für den Ausschnitt etwas höher als die errechneten liegen. Selbstverständlich kann man sich die Pappröhren auch selbst anfertigen: Man wickelt mittelstarkes bis starkes, weiches Papier auf einem Kern auf, der die zukünftige lichte Röhrenweite als Durchmesser hat; dabei wird jede Lage auf der vorhergehenden mit leichtflüssigem (notfalls mit Wasser verdünntem, also wasserlöslichem) Büroleim aufgeleimt.

Mancher Leser wird sich aus seinem Fahrrad-Scheinwerfer eine gute Lichtquelle bauen!



Wo Licht ist, ist starker Schatten

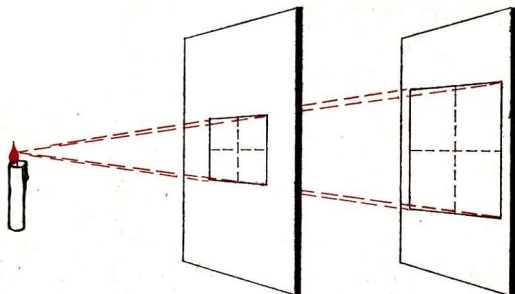
So sagte es Goethe (unter anderem) in seinem „Götz von Berlichingen“, 1. Akt. Daß man auch mit dem Schatten allerlei Physikalisches erleben kann, wollen wir jetzt beweisen.

Wir vergleichen die Stärke der Lichtquellen

Dabei benutzen wir zwei Eigenschaften des Lichtes: Seine Strahlen bewegen sich 1) geradlinig fort und 2) gleichmäßig nach allen Seiten. Die geradlinige Fortbewegung (nicht Fortpflanzung!) ist Grundlage des großen Teiles der Optik, die man „Strahlenoptik“ nennt – oder auch „geometrische Optik“, weil die Lichtstrahlen so vorzüglich (zumeist) als Geraden gezeichnet und deshalb mit Hilfe der Geometrie erklärt und berechnet werden können. Da sich das (ungestörte) Licht gleichmäßig nach allen Seiten ausbreitet, bildet es eine immer größer werdende Kugel. Deren Oberfläche vergrößert sich mit dem Quadrat ihres Abstandes r vom Mittelpunkt: $O = 4\pi r^2$. Folglich verteilen sich die Lichtstrahlen auf eine quadratisch wachsende Fläche; sie liegen weniger dicht nebeneinander. Man sagt: Die Leuchtdichte (so heißt die Flächenhelligkeit einer Lichtquelle, gemessen in Stilb) nimmt mit dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle ab.

Ein Strahlenbündel, das beispielsweise in 50 cm Entfernung durch ein 5 cm mal 5 cm ($= 25 \text{ cm}^2$) großes Fenster fällt, erhellt in doppelter Entfernung

Dicke d. Pappes	Umfang mm
0,5	8
1,0	10
1,5	14
2,0	17
2,5	20
3,0	23
3,5	26

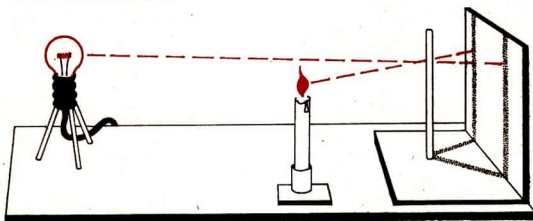


Abnahme der Beleuchtungsstärke

(100 cm) bereits die vierfache Fläche (100 cm^2) eines zweiten Kartons, in dreifacher Entfernung (150 cm) schon die neunfache Fläche (225 cm^2) des Fensters. Entsprechend nimmt die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung auf $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{9}$ ab. In der Natur kommt nichts aus dem Nichts und vergeht nichts in das Nichts; was auf der einen Seite gewonnen wird, geht auf der anderen Seite verloren (Sätze von der Erhaltung physikalischer Größen).

Wir wollen nach der langen, aber nötigen Vorrede zwei Lichtquellen im „Schatten-Fotometer“ miteinander vergleichen. Zu diesem Zweck lassen wir beide – seitlich etwas gegeneinander verschoben – den Schatten eines senkrechten Stabes, etwa eines Bleistiftes, auf eine weiße Fläche werfen. Die Lichtquellen, beispielsweise eine Kerze und eine 15-Watt-Glühlampe, werden so lange verschoben, bis beider Schatten nebeneinanderstehen und gleich dunkel erscheinen. Dann werden die Entfernungen der Lichtquellen vom Schirm gemessen. Die Lichtstärken, mit denen die Lichtquellen in die

Schatten zweier Lichtquellen



Richtung des Stabes strahlen, verhalten sich wie die Quadrate der Entfernungen. Beispiel: Verhalten sich die Strahlenlängen wie 20 : 80 cm, so verhalten sich die zugehörigen Lichtstärken wie $20^2 : 80^2 = 1 : 16$. Oder wir teilen die größere Länge durch die kleinere, also $80 : 20 = 4$, und setzen das Ergebnis ins Quadrat; bei doppelter Entfernung muß die Lichtquelle ja viermal, bei dreifacher Entfernung neunmal stärker sein usw.

Ebenso einfach ist das „Fettfleck-Fotometer“; es besteht nur aus einem Stück Papier, in einen kleinen Rahmen gespannt, mit einem ganz gewöhnlichen Fettfleck in der Mitte (der hier endlich einmal nicht am falschen Platz ist). Die zu vergleichenden Lichtquellen werden vor und hinter dem Fleck aufgestellt. Solange die Leuchtdichte einer Seite überwiegt, läßt der Fettfleck Licht nach der anderen Seite durch und sieht dort hell, auf der Seite des starken Lichtes jedoch dunkel aus. Wir verschieben die Lichtquellen so, daß der Fleck auf beiden Papierseiten weder hell noch dunkel aussieht, sondern scheinbar verschwunden (und unsichtbar) ist. Dann messen wir die Abstände der Lichtquellen vom Fleck und rechnen weiter wie beim Schatten-Fotometer.

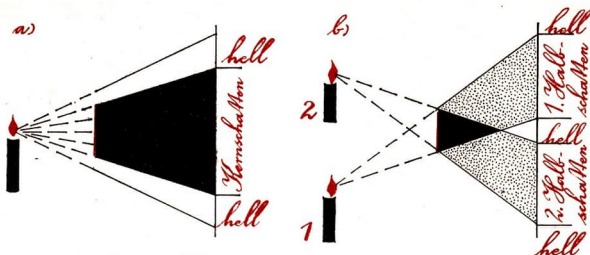
„Fotometer“ heißt freilich nicht „Lichtvergleich“, sondern Lichtmesser. Genaugenommen müßten wir als eine der Lichtquellen die Einheit „Neue Kerze“ (lateinisch *candela*) für die Lichtstärke nehmen; sie ist etwa ein Zehntel stärker als die alte „Hefner-Kerze“, die noch eine richtige Paraffinkerze mit bestimmten Ausmaßen war. Die „Candela“ ist eine verwickelte physikalische Angelegenheit.

Experimente und Spiele mit Schatten

Jeder beleuchtete Körper wirft einen Schatten; auch jeder Mensch hat ein naturgesetzliches Recht darauf. Es ist kein Wunder, daß ein Naturforscher und Dichter, nämlich Adelbert von Chamisso (1781 bis 1838), diesen Gedanken dichterisch verwertete: In seiner ziemlich gruseligen und traurigen Erzählung „Peter Schlemihls wundersame Geschichte“ verkauft der Titelheld seinen Schatten dem Teufel gegen einen immer reichgefüllten Geldbeutel. Er hat dadurch überraschend viel Ärger und Kummer und beendet sein schattenloses Dasein traurig in einer Höhle.

Wir behalten unsere Schatten und untersuchen sie genauer. Ein Schatten entsteht, wenn der Strahlenkegel einer Lichtquelle auf ein Hindernis trifft. Bei einer punktförmigen Lichtquelle entsteht hinter dem Hindernis (dem lichtundurchlässigen Körper) ein tiefer Kernschatten, bei ausgedehnter Lichtquelle (etwa zwei Kerzen) treten Kernschatten und Halbschatten auf.

Farbige Schatten kennen nur wenige; sie sind leicht darzustellen: Halten wir im Versuch mit den beiden Kerzen vor eine Kerze, etwa Nr. 1, ein farbiges Glas (oder durchscheinendes Papier oder Folie), so bleibt der Kernschatten schwarz, aber der 2. Halbschatten erscheint farbig und der 1. grau. Die Kerze 2 färbt mit ihrem farbigen Licht den 2. Halbschatten! Mit beiden verschiedenfarbig leuchtenden Kerzen wirken beide Halbschatten entsprechend farbig.



Kernschatten und Halbschatten



Es geht noch einfacher! Wenn bei beginnender Dämmerung noch etwas blaues Tageslicht auf unseren Tisch fällt, wir aber doch schon die elektrische Tischbeleuchtung mit ihrem gelblichen Schein einschalten mußten, dann brauchen wir nur unseren Schreibstift beide Schatten werfen zu lassen: Der eine (vom Tageslicht) erscheint gelb, der andere blau. Wer den Versuch ganz groß vorführen will, nimmt zwei ziemlich dicht nebeneinander stehende Tischleuchten und umhüllt die eine Glühlampe mit hellroter und die andere mit bläulich-grüner Folie. Ein (nicht zu naher) Körper wirft sehr schöne rote und grüne Schatten, und die meisten Zuschauer werden prompt annehmen, der rote Schatten komme von der roten Leuchte und der grüne Schatten von der grünen Leuchte!

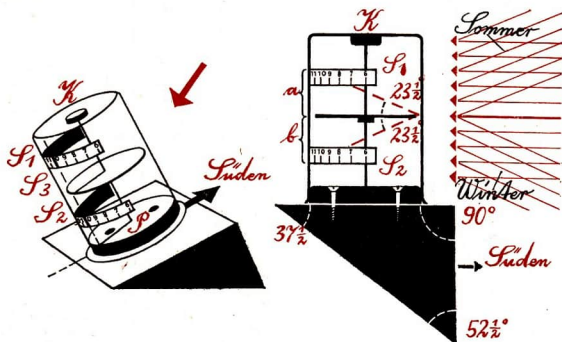
Bewegte Schattenbilder, mit den Händen und auch mit Figuren aus Pappe auf eine helle Fläche geworfen, sind bekannt; manche können mit beweglichen Fingern einen halben Zoo darstellen. Mit feststehenden Figuren und bewegten Lichtquellen, etwa mehreren Kerzen, die sich im Kreis bewegen, lassen sich vergnügliche Wirkungen erzielen. Mit zwei Kerzen und einem drehbaren Pappstern lassen sich sogar zwei Sternschatten herstellen, die sich gegenläufig bewegen. Wir wollen jetzt den Schatten eines einfachen Stabes für etwas ganz Besonderes (nach einem Vorschlag von B. Donath) verwenden!



Gegenläufige Schatten

Eine Sonnenuhr, die Tages- und Jahreszeiten angibt

Ein Becherglas, beispielsweise 145 mm hoch und mit 108 mm Durchmesser, Pappe, Papier, eine Stricknadel oder ähnliches, ein Holzklötz – das ist alles, was dazu nötig ist. Das Bild zeigt die ganze Anordnung. Es ist unbedingt nötig, die angegebenen Winkelgrößen beim Holzklötz genau einzuhalten; wer das nicht kann, muß einen Tischler bitten. Die Holzfläche für das Glas soll für die angegebene Bechergöße etwa 120 mm mal 140 mm betragen. Die Winkel sind wichtig, weil die schräge Fläche mit dem Glas zur Zeit der Tag- und Nachtgleichen im Frühling und Herbst genau in die Richtung der Sonnenstrahlen weisen soll – wobei die andere schräge Fläche (immer)



genau nach Süden gerichtet sein muß (mit Kompaß oder nach dem Mittags-Sonnenstand einzustellen).

Die Stricknadel, die den Zegerschatten (oder Schattenzeiger) spenden soll, ist im Glasboden in einem mit Alleskleber angeklebten Korkstückchen (K) und an der anderen Seite in einer genau in die Öffnung passenden Holz-scheibe (P) verankert. Sie soll aus der Holz-scheibe noch 10 bis 20 mm her-ausragen; mit diesem Ende steckt sie später in einem Loch im Klotz. Sie wird auf die richtige Länge verkürzt (nach ihrem Dienst in der Wissenschaft ist sie sowieso ihrem ursprünglichen Zweck entfremdet). Wenn das Glas nicht fest genug auf der etwa 20 mm hohen Holz-scheibe sitzt, hilft Um-wickeln mit Isolierband. Die Nadel trägt in ihrer Mitte, mit ein oder zwei Scheiben befestigt, eine ganz gerade Pappscheibe (besser noch eine un-empfindlichere Blechscheibe), fast so groß wie der Innenquerschnitt des Becherglases.

Um eine gewöhnliche Stunden-Sonnenuhr zu erhalten, brauchen wir nur noch eine Skale, auf der – bei Sonnenschein – der Nadelschatten die Uhr-zeit angibt. Wir wollen aber auch die Jahreszeit ablesen und haben dafür die Pappscheibe eingebaut, die uns die Sonnenhöhe anzeigt: Während des Sommers wird sie von oben, während des Winters von unten bestrahlt. Am 21. März und am 23. September, den Tag- und Nachtgleichen, streifen die Sonnenstrahlen sie nur, und sie wirft nur einen schmalen, waagerechten Schatten auf einen senkrechten Papierstreifen. Auf ihm zeichnet der Schat-ten der Pappe, nach oben und nach unten größer und kleiner werdend, mit seinem Rand die Jahreszeiten an, und wer will, kann sie auf dem Streifen eintragen (Eichung der Uhr nach Jahreszeiten). Damit der Schatten der Pappe die Stundenanzeige nicht stört, bringen wir weit genug oben und unten je eine Stundenskale an; der Nadelschatten bestreicht ja die ganze

Höhe des Glases. Für die etwa 15 mm hohen durchscheinenden Skalen nimmt man am besten Transparentpapier, das mit Plastikkleber für Glas angeklebt wird.

Nun noch etwas Wichtiges zum Ort und zur Einstellung der Streifen! Wir zeichnen Becherglas, Nadel, Pappscheibe und Holzscheibe in Originalgröße als Schnitt auf. Vom rechten Ende der Pappscheibe wird nach links oben und unten je ein Winkel von $23\frac{1}{2}^\circ$ mit dem Winkelmesser angetragen; wo der obere freie Schenkel das Glas trifft, soll der obere Rand der oberen Stundenskale sein – beim Treffpunkt des unteren freien Schenkels entsprechend der untere Rand der unteren Skale. Die $2 \cdot 23\frac{1}{2}^\circ = 47^\circ$ entsprechen dem Unterschied zwischen dem höchsten Sonnenstand (Zenit) im Sommer und dem im Winter (am längsten und am kürzesten Tage). Bei unserem Bechergößen-Beispiel sind a und b je 45 mm lang.

Die Länge der Skalen-Streifen ist gleich dem halben Umfang des Becherglases – durch Anvisieren der Enden durch das Glas über die Nadel leicht feststellbar. Jeder Streifen wird in zwölf Teile geteilt. Der Sockelklotz erhält eine Linie xy, die genau senkrecht zu den Kanten mn und qr liegen muß. Mitten auf der Linie wird ein Loch gebohrt, in das das herausragende Ende der Stricknadel hineinpaßt; alsdann wird die Holzscheibe P – genau Loch über Loch – mit dem Klotz verschraubt oder verleimt. Jetzt setzen wir endlich alles zusammen!

Die beiden Zwölfen der Skalen müssen genau über der Linie xy liegen. Entweder legen wir einen rechten Winkel an, oder wir stellen in Richtung Süd, das heißt in Verlängerung von xy, etwa 2 m entfernt eine brennende Kerze auf – als Sonne im Zenit. Der Nadelschatten soll mit xy zusammenfallen. Die beiden Skalenstreifen werden in den schon bekannten Höhen so angeklebt, daß beide Zwölfen genau auf dem Nadelschatten liegen. Der senkrechte Jahreszeitenstreifen wird anschließend zwischen den beiden Zwölfen angeklebt. Das Ganze wird mit farblosem Nitrolack lackiert oder gespritzt (Staubsauger und Zerstäuber, s. S. 131). Dann bekommt die Sonnenuhr ihren Platz an der Sonne – auf einer völlig waagerechten Fläche. Am besten mit Wasserwaage prüfen! Das Ganze ist eine Äquatorialuhr, denn ihre Achse ist zu der des Himmels parallel, und ihre Scheibenebene trifft, wenn man sie nach allen Seiten unendlich erweitert, mit dem Himmelsäquator zusammen.

Ein Loch zeichnet mit Licht Bilder

Als der griechische Philosoph und Naturforscher Aristoteles (384 bis 322 v. u. Z.) eines Tages, vom Sonnenschein aus dem Hause gelockt, im dichten Laubwald spazierenging, beobachtete er etwas Auffälliges: Durch eckige kleine Zwischenräume im Laub kamen Sonnenstrahlen und zeichneten auf dem Waldboden kreisförmige Lichtflecken, Bilder der Sonne – und nicht etwa der unregelmäßigen Öffnungen im Laub. Bei einer teilweisen Sonnenfinsternis sahen die Lichtflecken sichelförmig aus. Aristoteles berichtete voll Staunen darüber. Erklärt hat die Erscheinung erst der Grieche Maurolycus (1494 bis 1577).

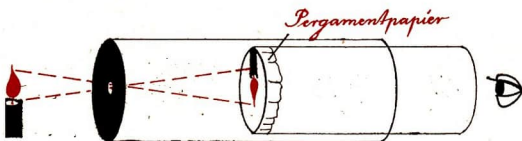


Wir kennen diese Erscheinungen heute gut: Ein kleines Loch im sonnenbeschienenen Rolladen läßt ein kleines Lichtbündel durch, und das wirft ein umgekehrtes Bild von draußen an die helle Wand im verdunkelten Zimmer. Ein Loch (etwa 1 mm Durchmesser) im Umschlag eines Heftes, bei hellem Wetter gegen das Fenster gehalten, zaubert ein kleines umgekehrtes Bild des Fensters auf die erste Seite des Heftes, die man etwa 2 cm entfernt hält. Das Loch wirkt wie eine Linse, und man kann damit eine „Lochkamera“ bauen und fotografieren; kleines Loch: scharfes Bild, aber dunkler; größeres Loch: heller, aber unschärfer. Wir experimentieren mit Löchern von 1 bis 4 mm Durchmesser.

Wir bauen eine Lochkamera

Man nennt sie auch mit dem lateinischen Namen „camera obscura“, die dunkle Kammer. Da die Lichtstrahlen von einer Lichtquelle oder einem beleuchteten Körper (der sie weitergibt) nur durch ein winziges Loch an einer der beiden Stirnseiten eindringen können, ergibt es sich zwangsläufig: Alle Strahlen kreuzen einander in dem Loch; die von oben kommen, landen unten und umgekehrt, die Strahlen von links laufen nach rechts und umgekehrt; die Folge ist, daß das Bild auf dem Transparentpapier an der Rückwand der Lochkamera seitenverkehrt kopfsteht.

Wir können eine solche Kamera leicht auf zwei Arten bauen: Mit zwei ineinanderschiebbaren Papprollen oder aus einem Holz- oder Pappkästchen (Größenordnungen: Rollenlänge je etwa 30 cm, große Zigarrenkiste oder Schuhkarton). Die Rückseite – bei der Rollenbauart auf der Innenrolle verschiebbar angebracht – ist immer lichtdurchlässiges, aber undurchsichtiges Transparentpapier; die Lochseite erhält eine größere Öffnung, über die dünnes, festes, nichtfaserndes schwarzes Papier geklebt wird. In



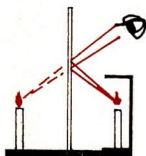
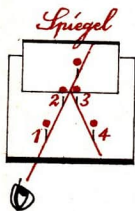
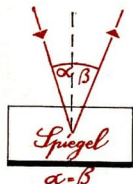
Lochkamera

dieses erst wird in der Mitte das Löchlein gebohrt mit einer Nadel, Reißzwecke, Lochzange usw. Alle Innenflächen sollen mattschwarz gestrichen oder geklebt sein, damit die Lichtstrahlen scharf und ungeschwächt bleiben. Die schönste camera obscura ist das schon erwähnte verdunkelte Zimmer, in das von außen ein scharfer Sonnenstrahl dringt.

Die Spiegelwelt

Eine merkwürdige Welt ist die Spiegelwelt! Eigentlich sind's zwei Welten: eine ernste und eine heitere, seltsame, sogar manchmal gruselige voller Zauber. In der ersten Spiegelwelt leben wir, ohne viel über den Spiegel nachzudenken; wir sehen nur, daß er überall benutzt wird: im Haushalt, in der Medizin, in den Fahrzeugen (als Rückspiegel), in Spiegelreflex-Kameras; beim Friseur und beim Schneider, in Cafés und Eisenbahnwagen und an vielen anderen Stellen. Auch die Astronomie braucht Spiegel. Mancher Leser weiß auch, daß unser heutiger Spiegel aus Glas mit versilberter Rückseite erst Mitte des 19. Jahrhunderts aufkam; vorher gab es Spiegel aus Glas mit Zinnamalgalam (Zinn-Quecksilber-Verbindung), davor – im 12. Jahrhundert – Glasspiegel mit Bleilegierung. Die alten Ägypter, Griechen und Römer hatten blankpolierte Scheiben aus Kupfer, Bronze, Silber und Gold. Und die Menschen der noch früheren Zeit haben ihr Aussehen in ruhigen Wasserspiegeln bestaunt.

Die heiter-gruselige Spiegelwelt finden wir im guten alten Jahrmarkt wieder, unserer unübertroffenen Fundgrube physikalischer Erlebnisse: Im „Lachkabinett“, wo die nach außen und nach innen gebogenen Spiegel schlanke Leute kugelförmig und dicke lang und dürr erscheinen lassen; außerdem in der Illusionsschau, auf deren Bühne Menschen und Dinge geisterhaft scheinbar aus dem Nichts erscheinen und wieder dorthin verschwinden, und im Irrgarten, wo die vielen Spiegelbilder den Besucher zum Narren halten. Kein Wunder, daß man von „Vorspiegelungen“ spricht, wenn jemand etwas vorschwindeln will!



Das Gesetz des Spiegels: die Reflexion

Das ist das einfache Reflexionsgesetz für alle Spiegel: Jeder Lichtstrahl wird im gleichen Winkel, in dem er einfällt, zurückgeworfen (reflektiert; vom lateinischen *reflectere* = zurücklenken). Oder anders ausgedrückt: Der Einfallswinkel α eines Lichtstrahles ist gleich dem Ausfallwinkel β (Reflexionswinkel).

Dabei meint man stets die Winkel zwischen Lichtstrahl und der Senkrechten auf dem Spiegel in dem Punkt, in dem der Strahl den Spiegel trifft. Einfallstrahl, Senkrechte und Ausfallstrahl liegen in einer Ebene. Wer hat das nicht schon praktisch durchgeführt bei dem Versuch, das Sonnenlicht mit Hilfe eines Taschenspiegels dorthin zu lenken, wo es eigentlich nicht hingehörte? Sonnenlicht, durch einen Kamm auf einen Spiegel geleitet, zeigt die Ablenkung gleich mit zahlreichen Strahlen.

Wir wollen das Gesetz aber noch experimentell beweisen!

Auf einer festen Zeichenfläche ist hinten ein Spiegel senkrecht befestigt. Wir stecken die Nadel 1 und 2 (am besten mit bunten Köpfen) fest. Die Aufgabe lautet: die Nadeln 3 und 4 vor dem Spiegel so zu stecken, daß ihre Spiegelbilder in einer Reihe mit den Nadeln 1 und 2 liegen. Das ist das erste Mal gar nicht so leicht. Wir schauen genau in Richtung 1–2 in den

Spiegel und kümmern uns nicht darum, was die rechte Hand tut, sondern nur darum, ob 3 und 4 im Spiegelbild, also scheinbar hinter dem Spiegel, den Platz in der Verlängerung 1–2 erhalten.

Verbinden wir 1 und 2 mit einer Geraden bis zum Spiegel und 3 und 4 dergleichen, so stellen wir fest: Beide Geraden treffen einander am Spiegel. Errichten wir an dem Punkt die Senkrechte auf dem Spiegel, so sind die beiden Winkel links und rechts von der Senkrechten – Einfall- und Ausfallwinkel – gleich. Das Spiegelbild ist symmetrisch zur Wirklichkeit; die Symmetrieachse ist der untere Rand des Spiegels. Das Spiegelbild ist nur ein scheinbares (virtuelles) Bild; andernfalls könnten wir es um die Achse klappen und mit der Wirklichkeit vor dem Spiegel zur Deckung bringen. Ebene Spiegel reflektieren also die von einem Punkt ausgehenden Strahlen so, daß es so aussieht, als befände sich der Punkt in symmetrischer Lage hinter dem Spiegel, also ebenso weit hinter dem Spiegel wie davor. Beim Fotografieren eines Spiegelbildes muß man diese scheinbare Entfernung berücksichtigen! Soll jemand als Spiegelbild aufgenommen werden, der beispielsweise 2 m vor dem Spiegel steht, so muß der Abstand der Kamera vom Spiegel +2 m eingestellt werden. Spiegelbilder haben die gleiche Größe wie die gespiegelten Gegenstände. Scheinbare Bilder kann man übrigens nicht auf Papier „einfangen“; das ist nur mit wirklichen („reellen“) Bildern möglich. Wie das Spiegelbild einer brennenden Kerze, die gegen das Auge des Betrachters abgedeckt ist, entsteht, läßt sich geometrisch gut darstellen.

Ein senkrecht auf den Spiegel fallender Lichtstrahl läuft auf dem Einfallsweg wieder zurück; $\alpha = \beta = 0^\circ$. Das ist im allgemeinen der Fall, wenn sich jemand im Spiegel betrachtet. Man sieht sich da seitenverkehrt, sozusagen nach einer Kehrtwendung um 180° . Haben Sie, lieber Leser, schon einmal versucht, sich vor dem Spiegel mit der Schere in der rechten Hand ein einzelnes Haar über dem linken Ohr abzuschneiden? Spiegelfechterei, Spiegelschererei! Warum sehen wir uns übrigens nur seitenverkehrt und (glücklicherweise) nicht auch noch kopfstehend im Spiegel? Das Reflexionsgesetz gilt auch für die Luftwellen des Schalles, für Wasserwellen und für elastische feste Körper (die Ballspiele einschließlich des Billardspieles geben gute Beispiele).

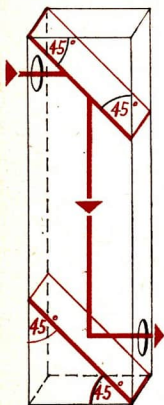


Spiegelspiele

Spiegelschrift: Ein Blatt Kohlepapier wird mit der Farbseite nach oben auf den Tisch gelegt, darauf ein Blatt weißes Schreibpapier. Wir beschreiben das Papier, heben es vom Kohlepapier ab und haben auf der Rückseite des Schreibpapiers alles Geschriebene in Spiegelschrift. Sie ist im Spiegel zu lesen. Schriftsetzer können beim Setzen mit der Hand ebenso wie Metteure beim Zusammenfügen der Zeilen zu Seiten einer Druckschrift Spiegelschrift auch ohne Spiegel lesen. Warum?

Endlose Spiegelbilder: Zwei senkrechte Spiegel stehen einander in 15 bis 30 cm Abstand gegenüber; zwischen ihnen liegt ein Gegenstand. In jedem





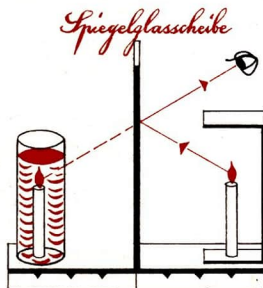
Spiegel sehen wir eine endlose Wiederholung des Spiegelbildes vom Gegenstand, immer kleiner werdend. Diese hübsche und verblüffende Erscheinung kann man gelegentlich in Schlössern und dergleichen sehen, wo auf diese Weise zum Beispiel endlos lange Räume mit Säulen zum Scherz vorgespiegelt werden. Ein Geldstück, auf solche Weise vervielfacht, macht uns leider auch nicht reicher . . . Mit einer kleinen Figur, die ein brennendes Kerzchen trägt, läßt sich ein eindrucksvoller Fackelzug darstellen. Stehen die Spiegel im Winkel zueinander, so bilden die Spiegelbilder Teile eines Kreises.

Winkelspiegel: Die „Seitenverkehrtheit“ läßt sich durch einen zweiten Spiegel, der im Winkel zum ersten steht, wieder ausgleichen. Der Schneidermeister verwendet meist einen großen Spiegel mit zwei drehbaren Seitenspiegeln. Er nennt sie „Profilspiegel“ und benutzt sie, damit der Kunde auch von der Seite sehen kann, ob der neue Anzug oder das neue Kleid richtig sitzt. In einem Winkelspiegel können wir die gespiegelte Uhr „richtig“ ablesen.

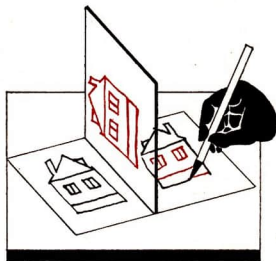
Sehen, ohne gesehen zu werden: Das ist mit dem „Sehrohr“ möglich. Es ist aus einem runden oder viereckigen Papprohr und zwei Spiegeln nach dem Bild leicht zu bauen. Wichtig ist, daß die Spiegel an den Schmalseiten mit genau 45° anliegen, damit der Lichtstrahl zweimal im rechten Winkel abgelenkt wird. Die Öffnungen liegen der Spiegelmittle gegenüber. Das Sehrohr, 30 bis 40 cm lang, ist vor allem für Geländespiele gut geeignet.

Auch eine gewöhnliche Glasplatte kann spiegeln

Sie tut es immer ein wenig; wir merken es nur nicht, weil durchflutende Lichtmengen die geringe Spiegelung überdecken. Tagsüber sehen wir ungehindert aus dem Zimmer ins helle Licht draußen; ist es aber draußen dunkel, so spiegeln sich die Dinge im Raum in der Fensterscheibe. Sie spiegeln sich – schräg betrachtet – sogar doppelt; einmal an der Innenseite und



Die Kerze im Wasser



zugleich an der Außenseite der Scheibe. Das ist übrigens auch bei Wandspiegeln zu beobachten, wenn man einen Gegenstand in einiger Entfernung in Kopfhöhe neben sich hält und das Spiegelbild betrachtet. Das von der Oberseite des Glases gespiegelte Bild ist undeutlich und viel schwächer als das an der Unterseite mit der Spiegelschicht entstandene. Will man solche Verdopplung vermeiden, muß man (teure) „oberflächenverspiegelte“ Spiegel nehmen. Schaufensterscheiben spiegeln Teile der Außenwelt wider; es ist daher nicht leicht, Auslagen im Schaufenster zu fotografieren.

Brennt die Kerze im Wasser? Mit einer verdeckten, brennenden Kerze und einer Glasscheibe (am besten aus Spiegelglas) können wir eine Kerze (scheinbar) ohne Hitze und sogar im Wasser brennen lassen; wir stellen eine gleich große, jedoch nicht brennende Kerze oder ein wassergefülltes Glas im gleichen Abstand hinter die Scheibe.

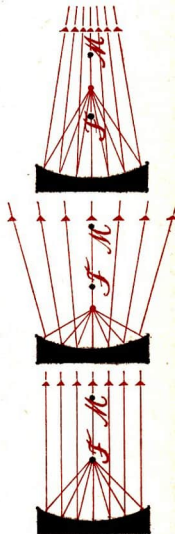
Symmetrische Bilder zeichnen können wir ebenfalls mit einer senkrechten Glasscheibe (die sich am schnellsten mit Knetmasse feststellen läßt). Das Originalbild liegt links von der Scheibe; rechts zeichnen wir das (schwache) Spiegelbild nach, von links oben durch die Scheibe schauend.

Geistererscheinungen können auch mit der teilweise reflektierenden Glasscheibe hervorgerufen werden, die – in entsprechender Größe – auf der Bühne steht, schräg zur Vorderseite, so daß aus den Kulissen Figuren darauf projiziert werden können. Man kann so den Eindruck erwecken, daß sich die Geister zwischen den wirklichen Personen im erleuchteten Bühnenraum hinter der Scheibe befinden. Durch Verändern der Beleuchtung vor und hinter der Scheibe kann auch die Reflexionswirkung der Glasscheibe verändert werden.

Von gekrümmten Spiegeln

Davon gibt es verschiedene Formen: Zylinderspiegel, Kugelspiegel (beispielsweise verspiegelte Weihnachtsbaum-Kugeln), Hohlspiegel; mit allen lassen sich reizvolle Experimente machen. Der Zylinderspiegel verzeichnet nur in der Querrichtung und da wie ein Kugelspiegel. Der Kugelspiegel

*Strahlen
beim Hohlspiegel*



verkleinert stark und verzerrt zugleich. Der nach außen gewölbte, erhabene (konvexe) Spiegel wird vor allem als Rückspiegel bei Fahrzeugen benutzt; er liefert, wie alle erhabenen Spiegel, stets aufrechte, verkleinerte Spiegelbilder. Jeder Hohlspiegel ist ein Teil einer gläsernen Hohlkugel, die innen verspiegelt ist; er liefert ein aufrechtes, vergrößertes Bild (beispielsweise der Rasierspiegel). Er wird u. a. im Spiegelfernrohr benutzt, in einfacher Form als Reflektor in Taschenlampen.

Lichtstrahlen (etwa Sonnenstrahlen), die parallel in einen Hohlspiegel einfallen, werden auf den „Brennpunkt“ F (lateinisch focus) reflektiert; die Strahlen eines Glühlämpchens, das im Brennpunkt in den Hohlspiegel hineinleuchtet, werden nach außen geworfen, die achsennahen parallel (s. S. 276). F liegt in der Mitte zwischen Spiegel und dem Mittelpunkt M der Hohlkugel, von der der Hohlspiegel ein Teil ist. Sitzt das Glühlämpchen G zwischen F und Spiegel, laufen die Strahlen auseinander; sitzt es zwischen F und M , so laufen sie zusammen. Aus dem Mittelpunkt laufen die Strahlen in sich selbst zurück, weil die Radien ja senkrecht auf der Spiegelfläche stehen.

Scheinwerfer brauchen Spiegel, die noch genauer Parallelstrahlen (auf größere Entfernungen) aussenden; hier werden Parabolspiegel benutzt, die eine Paraboloidfläche haben: eine Parabel, die sich um ihre Achse dreht.



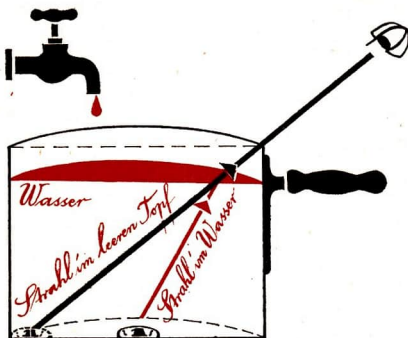
Der Lichtstrahl wird gebrochen

Ein Kraftwagen fährt von einer Asphaltstraße über eine schrägliegende, weiche Sandfläche und danach wieder auf die alte, feste Straße. Was geschieht? Die Reibung beim ersten Rad verlangsamt dessen Bewegung; der Wagen zieht in die Richtung des gebremsten Rades. Beim Hinunterfahren will der Wagen wieder in die alte Richtung. Wir stellen einen Tisch längs schräg auf und bedecken das mittlere Drittel (quer) mit einem dünnen, weichen Tuch. Von oben lassen wir eine große Garnrolle oder zwei Räder auf einer Achse schräg auf das Tuch zu laufen. Wir beobachten das gleiche wie beim Wagen. Und was geschieht, wenn die Lichtstrahlen plötzlich in einem anderen „Medium“ weiterlaufen müssen? (So nennt man den umgebenden Stoff nach dem lateinischen Wort für Umgebung, Mitte.) Sie ändern mehr oder weniger ebenfalls ihre Richtung; jeder schräg einfallende Lichtstrahl wird „gebrochen“.



Wir experimentieren mit Lichtbrechung

Wer kennt nicht den scheinbar gebrochenen Löffel im Glas mit Wasser? Ein weiterer Versuch: Wir legen eine Münze mitten auf den Boden eines leeren Kochtopfes und schauen so schräg in den Topf, daß wir die Münze nicht mehr sehen können (schwarzer Lichtstrahl). Dann wird Wasser in den Topf gegossen – und gleichzeitig sehen wir die Münze, ohne unser Auge von der Stelle bewegt zu haben! Der Lichtstrahl ist an der Wasseroberfläche



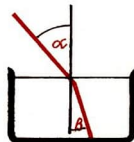
gebrochen worden; er kommt jetzt (farbig) von der Münze bis ins Auge. Es sieht so aus, als sei sie ein Stück bis zur Sichtbarkeit gehoben worden. Wird das Wasser entfernt, verschwindet die Münze wieder aus dem Blickfeld. Eines fällt sofort auf: Solche „Brechung“ gibt es nur beim Übergang von einem Medium in ein anderes, hier von Wasser in Luft, denn die Lichtstrahlen kommen von dem beleuchteten Topfboden mit der Münze. Und so ist es auch! Wir müssen das noch genauer untersuchen.

Lichtstrahlen statt der Fische im Aquarium

Wir füllen ein Aquariumglas (oder ähnliches; brauchbare lichte Größe: Bodenfläche 295 mm mal 155 mm, Höhe 150 mm) bis etwa 50 mm unter die Oberkante mit Wasser und fügen einige Tropfen (nicht mehr!) Milch hinzu, um den Weg des Lichtes sichtbar zu machen; auch etwas Fluorescein oder Eosinlösung (rote Tinte) ist brauchbar. Ein ganz schräg hineingelegter Stab (Lineal) wirkt beim Eintritt ins Wasser scheinbar nach oben gebrochen, wenn wir dicht am Stab entlang von oben schauen. Seitlich – durch die Glaswand – gesehen, ist das nicht der Fall.

Nun müssen wir unser Labor verdunkeln, denn wir lassen einen Lichtstrahl aus unserer Lichtquelle von seitlich oben auf das Wasser fallen und bewegen ihn hin und her. Der Knick, die Brechung an der Eintrittsstelle ins Wasser, ist deutlich zu erkennen; er ist um so stärker, je flacher der Strahl auftrifft. Nur bei senkrechtem Auftreffen behält er seine Richtung! Der Lichtstrahl wird beim Übergang vom dünneren Medium (hier: Luft) in das dichtere (hier: Wasser) zum Einfallslot (Senkrechte zur Oberfläche im Übergangspunkt) hin geknickt; der Brechungswinkel wird kleiner. Beim Übergang vom dichteren in ein dünneres Medium wird der Strahl vom Einfallslot weg geknickt, der Brechungswinkel also größer als der Einfallswinkel. (Wenn

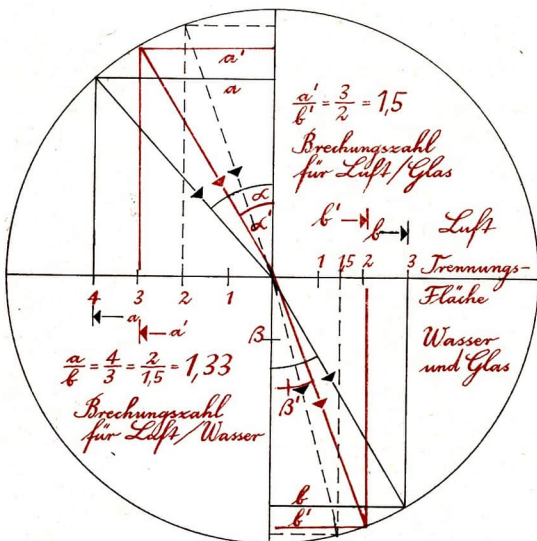
Brechungsgesetz



man die Lichtquelle in unveränderter Neigung aus dem Bereich der Wanne führt, sieht man plötzlich auf der hellen Tischfläche die Stelle, wo der Strahl ohne Brechung landet.) Und wenn wir die Wanne auf vier feste Füße stellen (Bücher sind für den „Fall des Falles“ meist wasserempfindlich!), dann können wir gut beobachten, wie der schräge Strahl nach dem Austritt aus dem Wasser (unterhalb der Wanne) wieder seine ursprüngliche Richtung annimmt. Die zusätzlichen Brechungen in der Glaswand lassen wir großzügig außer acht; man kann jedoch an einer dicken Glasscheibe dies alles ebenfalls beobachten.

Das beste Beispiel, oft mit schönen Farbspielen (Dispersion, s. S. 295), bietet die Sonne beim Untergehen. Dank der Brechung ihrer Strahlen beim Übergang vom Vakuum des Weltraumes in die verschieden dichten Luftschichten der Atmosphäre sehen wir sie – obendrein abgeplattet – noch über dem Horizont; obwohl sie in Wirklichkeit schon untergegangen ist. Die Abflachung kommt daher, daß die Strahlen vom unteren Rand der Sonne mehr gebrochen werden als die vom oberen Rand.

Davon wußte schon der griechische Naturforscher Archimedes (um 250 v. u. Z.) allerlei. Aber den mathematischen Zusammenhang zwischen den Einfall- und den Brechungswinkeln fand erst der Holländer Willebrord



Snellius 1615. Dieses *Brechungsgesetz* lautet: *Das Verhältnis der Projektionen a und b des einfallenden und des gebrochenen Strahles auf die Grenzfläche ist für die gleichen Medien (Stoffe) immer gleich (konstant);* man nennt es die Brechungszahl n . Das klingt gelehrt und entsprechend umständlich; unsere Zeichnung zeigt es einfacher. Andere Medien haben andere Brechungszahlen. Wer schon in die Geheimnisse der Trigonometrie eingedrungen ist, der weiß, daß die genannten Projektionen die Sinus des Einfallswinkels α und des Brechungswinkels β sind; er schreibt das Gesetz viel einfacher:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \frac{c_1}{c_2}$$

Die Zahlen c_1 und c_2 sind die Lichtgeschwindigkeiten in den beiden (verschiedenen) Medien. Beim Übergang von Luft in Wasser ist $n = 4 : 3 = 1,33$, in Benzol 1,48, in Kronglas 1,52, in Diamant 2,42. Der Quotient

$\frac{c_1}{c_2}$ sagt etwas Verblüffendes aus: Die Lichtgeschwindigkeit (mit fast 300 000 km/s für das Vakuum ein feststehender Wert) sinkt in dichteren Medien ab und erreicht beim Austritt aus diesen wieder den ursprünglichen vollen Wert, ohne daß Energie zugeführt wird! Licht ist schon eine merkwürdige, des Merkens wohl würdige Erscheinung!

Wasser wird plötzlich zum Spiegel

Wir setzen unsere wassergefüllte Glaswanne auf eine Zeitung. Wir schauen senkrecht hinein und können den Text lesen. Langsam weiter zur Seite gewendet: Plötzlich schimmert der Boden silbrig, und die Zeitung ist unsichtbar! So geht's uns auch, wenn wir schräg von unten (mit Kniebeuge oder mit einem Spiegel) in das Wasser schauen. Am besten kennt das der Taucher: Er sieht von einem halb im Wasser stehenden Menschen nur die untere Hälfte; die obere Hälfte ist verschwunden. Bei glatter Wasseroberfläche spiegelt sich die untere Hälfte – die Füße nach oben.

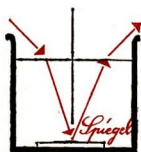
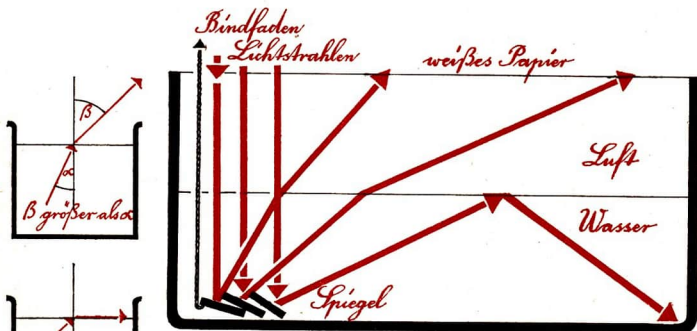
Das silberne Reagenzglas: Ein leeres Reagenzglas wird etwas schräg ins Wasser gehalten; wir sehen von oben darauf. Die Oberfläche schimmert wie Silber. Liegt das Glas zu flach, verschwindet der Silberschimmer. Ein Glastrichter, mit der großen Öffnung in Wasser gedrückt, während die enge Öffnung verschlossen ist, zeigt – von oben gesehen – die gleiche Erscheinung.

Die verschwundene Stecknadel: Eine etwa 30 mm lange Stecknadel mit farbigem Kopf wird in den Mittelpunkt einer Holz- oder Pappscheibe von 40 mm Durchmesser gesteckt. Ein großes Becherglas (etwa 80 mm Durchmesser) wird bis an den Rand mit Wasser gefüllt; auf das Wasser wird die Scheibe gelegt – mit der Nadel nach unten. Eigentlich müßten wir die Nadel wenigstens teilweise sehen können; sie ist jedoch unsichtbar geworden. Wir sehen sie erst, wenn wir von der Seite senkrecht durch das Wasser auf sie schauen. Und warum ist das so?



Keine Zauberei, sondern totale Reflexion

Es geht hier immer um Fälle, in denen der Lichtstrahl aus einem dichteren Medium (hier: Wasser) in ein dünneres (hier: Luft) übergeht. Das müssen wir genauer untersuchen! Wir führen einen Lichtstrahl (Lochblende oder ein Spalt!) von einer unteren Kante durch das Wasser nach oben, erst



Totale Reflexion

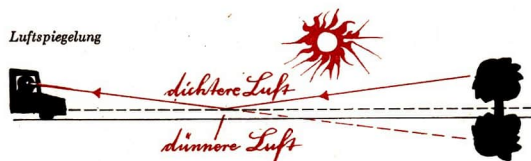
senkrecht, dann quer durch die ganze Länge der Wanne bis zum anderen Ende. Das lässt sich sehr gut mit einem rechteckigen Spiegel machen, der an der „Ausgangskante“ im Wasser liegt und mit Hilfe eines Bindfadens (Alleskleber!) leicht in jede Schräglage gebracht werden kann. Im Notfall genügt die ebene Seite eines Rasierspiegels. (In der Zeichnung sind die verschiedenen Stellungen des Spiegels nebeneinander dargestellt, um den jeweiligen Lichtstrahl deutlicher zu machen; der Spiegel bleibt in Wirklichkeit in seiner Ecke.) Die Wanne wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt; sie wird mit hellem Papier abgedeckt, das an der einen Schmalseite Durchlässe für Lichtstrahl und Bindfaden hat. Den Rauch vom Rest der Zigarette auf Seite 142 blasen wir unter den Deckel, um den Lichtstrahl auch in der Luft sehen zu können.

Bei waagrechttem Spiegel wird der Lichtstrahl in sich selbst reflektiert. Bei wachsendem Winkel wird die Brechung an der Grenzfläche vom Einfallslot weg immer stärker; der Brechungswert ist jetzt $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{3}{4} = 0,75$.

Beim „Grenzwinkel“ $\alpha = 48,5^\circ$ läuft der Strahl an der Fläche entlang. Wächst α weiter, so reflektiert die Fläche den Strahl total (nach unten). Sie tut das viel gründlicher als normale Spiegel, die immer einen mehr oder weniger großen Teil des Lichtes verschlucken; daher der Ausdruck „totale Reflexion“. Wie bei jeder Spiegelung, so ist auch hier der Ausfallwinkel gleich dem Einfallswinkel.

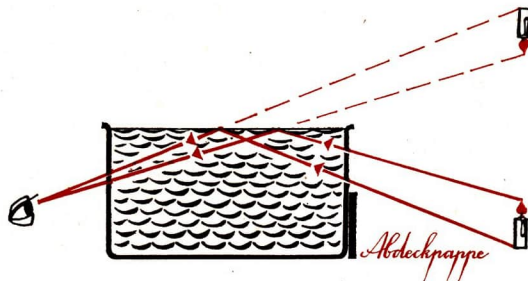
Der getäuschte Wüstenwanderer

Liegt eine dünnere (warme) Luftschicht über einer dichteren (kalten), so kann die totale Reflexion die berühmte „Fata morgana“ hervorrufen. Eine solche Luftspiegelung spiegelt dem durstigen Wanderer eine Oase vor, die viel weiter entfernt ist, als er glaubt.



Auf der heißen Autobahn kann man auf langen, ebenen Strecken gelegentlich in der Ferne Bäume und anderes, gespiegelt in einer Wasserfläche, beobachten. Die Ursache dieser optischen Täuschung ist die Grenzschicht zwischen optisch dünner (unten) und optisch dichter (oben) Luftschicht.

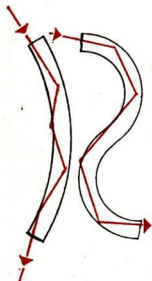
Wir, die wir Bescheid wissen, können die Fata morgana im Experiment nachmachen: eine gegen Sicht abgeblendete brennende Kerze hinter einer Schmalseite der Wanne; wir schauen auf der anderen Seite von unten gegen



die Wasser-Grenzschicht. Das Spiegelbild der Kerze ist oben zu sehen. Der Wüstenwanderer kann auch mit dem Fernrohr die wirkliche Oase nicht sehen, weil die Erdkrümmung sie verdeckt.

Nicht nur Lichtwellen, sondern auch Ultrakurzwellen für Rundfunk und Fernsehen (die ja ebenfalls elektromagnetische Wellen, nur im anderen Frequenzbereich, sind) werden an der Berührungsfläche der verschieden dichten Luftschichten total reflektiert; man nennt das „Inversion“ (vom lateinischen *invertere* = umkehren). Dadurch entstehen vorübergehende „Überreichweiten“ der reflektierten Sendungen.

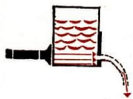
Der gefangene Lichtstrahl



Schicken wir ihn in eine (nicht allzusehr) gebogene Glasröhre oder Glasstange, so läuft er in ihr entlang und kommt gehorsam in ganz anderer Richtung am anderen Ende wieder heraus. Er kann nicht entweichen, weil er an der Wand totalreflektiert wird (Grenzwinkel Glas–Luft ist 25° bis 42°). Er saust von einer Seite zur anderen, im Zickzack, und hat so einen etwas längeren Weg; aber das macht bei seiner Geschwindigkeit nichts aus.

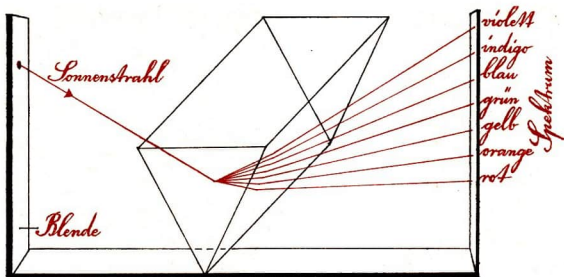
Aus einer vollen Kochflasche oder einem Rundkolben lassen wir langsam einen gleichmäßigen Wasserstrahl laufen und beleuchten zugleich den Boden des Gefäßes recht hell: Der Wasserstrahl trägt das Licht auf seinem Weg mit, solange er nicht auseinanderfällt. Am besten geht das mit einer Flasche, die unten seitlich eine Öffnung hat (Tubusflasche). Da kann man von oben ständig nachfüllen und den leuchtenden Strahl, den man gegen Flasche und Lichtquelle abdeckt, gut beobachten.

Ganz leicht lenkbar ist der Lichtstrahl durch die neue *Faseroptik* geworden. Hunderttausend und mehr mikroskopisch feine Fäden aus Glas oder Plast (mit 10 bis 30 tausendstel Millimeter Durchmesser) werden zu „Faserlichtleitern“ gebündelt. Sie leiten das Licht in schwer zugängliche Stellen von Geräten ebenso leicht wie in Hohlorgane des Körpers, Magen, Blase usw. Auch in der Laserstrahl-Technik beginnt der Faserlichtleiter eine Rolle zu spielen.



Das Prisma bringt die Farben an den Tag

Daß weißes Sonnenlicht beim schrägen Eintritt in das dichtere Medium gebrochen wird und daß dieses beim Austritt wiederum geschieht, ist uns bekannt; wir erwarten es im Experiment. Neu beim Lichtdurchgang durch ein *Prisma* – und zugleich sehr eindrucksvoll – ist eine weitere Erscheinung: Das weiße Licht fächert sich in eine Reihe leuchtender Farben auf: rot, orange, gelb, grün, blau, indigo, violett, in ihrer Gesamtheit „Spektrum“ genannt (lateinisch: Erscheinung, Bild). Ein Farbenband breitet sich aus; und da Ausbreitung, Zerstreuung lateinisch *dispersio* heißt,



spricht man von *Dispersion*. Es zeigt sich, daß weißes Licht keine einheitliche Wellenlänge hat, sondern aus einer Reihe elektromagnetischer Wellen verschiedener, benachbarter Wellenlängen besteht. Daß die Farben auseinanderfächern, hat folgende Ursache: Die Lichtgeschwindigkeit sinkt im Wasser um etwa ein Viertel, im Glas um etwa ein Drittel ab, aber für jede Farbe verschieden stark – für rot am wenigsten, für violett am stärksten. Bei der Brechung des Lichtes werden die einzelnen Farben in verschiedene Richtungen geknickt; der (schnellere) rote Lichtstrahl wird aus seiner ursprünglichen Richtung weniger abgelenkt als der (langsamere) violette. Jede Wellenlänge zeigt so ihre eigene Farbe (Spektralfarbe). Durch eine Sammellinse hat schon Newton alle Spektralfarben wieder zu weißem Licht vereinigt. *Das weiße Licht ist die Quelle aller Farben, und alle Farben zusammen geben wieder das weiße Licht.*

Wir erzeugen leuchtende Spektralfarben

Unsere künstlichen Lichtquellen liefern zwar auch Spektralfarben – aber nicht so leuchtend und so gleichmäßig wie die Sonne. Es lohnt sich schon, das Zimmer zu verdunkeln und einen Lichtstrahl oder Lichtstreifen durch ein Loch oder einen Spalt hereinzulassen und durch das Prisma zu schicken (nicht mittags, weil die Sonne dann zu hoch steht; es sei denn, wir lenken durch einen Spiegel um). Wer kein Glasprisma hat, baut sich ein Wassprisma. Bequem zu benutzen ist das mit Wasser gefüllte Holzprisma, hergestellt aus einem wasserfest gestrichenen Holzbrettchen, etwa 10 mal 5 cm groß, zwei ebenso großen Streifen Fensterglas und zwei wasserfesten Seitenwänden aus Holz (Dreiecken, jede Seite 5 cm lang). Mit Aquariumkitt wird alles zusammengesetzt und befestigt. Vor Einkitten des zweiten Dreiecks nicht vergessen, Wasser einzufüllen!



senkrechter Strahl
in Fensterblende



Wasserprisma

Das einfachste Prisma besteht aus einer Schale mit Wasser und einem schräg hineingelegten Spiegel; auch eine Ecke unserer Wasserwanne (gefüllt) kann als Prisma dienen. Allerdings müssen die Glaswände dazu glatte Oberflächen haben; sehr billiges Preßglas verzerrt die Farben.

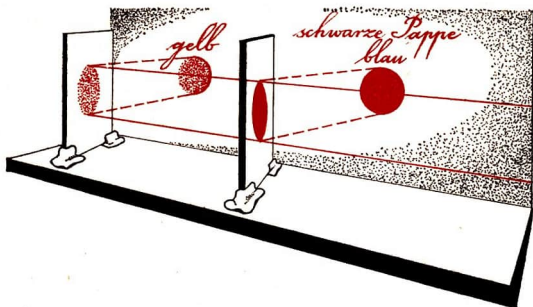


Farbenspiele

Wir schauen durch ein handelsübliches rechtwinkliges Prisma: Alle hellen Flächen vor uns sind mit wunderschönen spektralfarbenen Rändern geschmückt, ein Papierrechteck beispielsweise links mit Rot-Orange-Gelb und an der Seite gegenüber mit Grün-Blau-Indigo-Violett.

Aus Weiß kommen die Lichtfarben, zu Weiß werden sie wieder – wenn wir sie auf einen *Farbenkreisel* auftragen und so schnell umlaufen lassen, daß sich die einzelnen Farbeindrücke auf unserer etwas trägen Netzhaut im Auge vermischen. „Körperfarben“ aus dem Farbenkasten sind leider nicht so rein und leuchtend wie Lichtfarben; ein reines Weiß gibt der Farbenkreisel deshalb kaum her. Aber das Experiment lohnt sich trotzdem: Nach dem Bild werden die Wasserfarben auf weiße Pappe dünn aufgetragen. Ein Holzstäbchen (Zündholz) genau durch die Mitte gesteckt, unten angespitzt – und wir können den Kreisel „andrehen“ (s. auch S. 72).

Blaues und gelbes Licht ergibt Weiß; es sind *Ergänzungsfarben* (auch Komplementärfarben genannt – nach dem lateinischen *complementum* = Ergänzung). Rot und Grün sowie Orange und Violett ergänzen einander ebenfalls zu Weiß. G. Niese hat dazu einen hübschen Versuch angegeben: Zwei hell beleuchtete Papierscheiben G und B, eine gelb, die andere blau, spiegeln ihr farbiges Licht über zwei teilreflektierende und zugleich lichtdurchlässige Glasplatten auf einen Punkt A. Hier nimmt unser Auge eine weiße Scheibe auf, wenn die Spiegelbilder von G und B genau übereinander liegen. G und B sollen auf schwarzem Hintergrund angebracht sein. Der



richtige Winkel der Glasplatten muß mit einiger Geduld ausprobiert werden.

Malerfarben wirken anders: Blau und Gelb ergeben das Grün. Das liegt daran, daß sie weißes Licht von außen aufnehmen und dabei die meisten farbigen Anteile verschlucken. Blaues Farbpulver gibt nur Blau und etwas Grün zurück, gelbes nur Gelb und etwas Grün. In der Mischung verschlucken sie gegenseitig Blau und Gelb – und Grün bleibt übrig; ein Schluckverfahren, das heißt: ein Ausfiltern, das Gegenteil des Zusammensetzens bei den Lichtfarben.

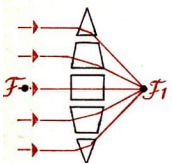
Wer optisch einwandfreie Gläser beschaffen kann (das ist nicht leicht), der spiegelt zwei Komplementärfarben mit Hilfe von zwei Spiegeln an die Wand und bringt die farbigen Leuchtflächen zur Deckung: Blau + Gelb = Weiß, Blau + Rot = Purpur, Grün + Blau = Pflaumenblau, Rot + Grün + Blau (mit drei Spiegeln) = Weiß. Warum sind übrigens bei Nacht alle Katzen grau?



Schein und Wirklichkeit der Linsen

Der Schritt vom Prisma zur Linse ist nur klein, denn man kann sich jede Linse aus Prismen zusammengesetzt denken. Sie wird freilich mit viel Mathematik und feinsten Technik so hergestellt, daß sie zwar Lichtstrahlen bricht, aber ohne Farberscheinungen. Man setzt sogar mehrere Linsen zu einer Gesamtlinse zusammen, um Dispersion und andere Fehler zu vermeiden. Die Oberflächen der Linsen sind Teile einer Kugelfläche.

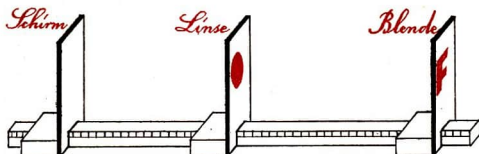
Zunächst etwas Praktisches: Wir wollen mit Linsen experimentieren. Dazu müssen sie eine Fassung haben, die senkrecht aufzustellen ist – am besten mit Fuß, der auf einer Leiste verschoben werden kann (das ist eine „optische Bank“). Dem Bastler, der starke Pappen und Sperrholz hat, macht das



Vom Prisma zur Linse



keine große Mühe: Der Holzfuß hat unten einen viereckigen Ausschnitt, der über zwei aufeinandergeklebte oder -genagelte Lineale, 50 cm lang, paßt. Am Holzfuß wird eine starke Pappe befestigt, die die Linse folgendermaßen trägt: Die Linse paßt genau in ein Loch in der Pappe; zwei Ringe mit etwas kleinerem Innendurchmesser halten die Linse an beiden Seiten fest.



Selbstverständlich gibt es noch andere Möglichkeiten, beispielsweise mit Metallbändern, Klebestreifen, Knetmasse; nur eines muß unbedingt sicher sein: Die Mittelpunkte aller Linsen und von allem, was wir sonst noch auf die optische Bank setzen wollen, müssen ganz genau in einer geraden Linie liegen! Abweichungen seitlich oder in der Höhe lassen das Experiment mißlingen, weil die Strahlen Seitensprünge machen. *Der Strahl durch den Mittelpunkt einer Linse wird als einziger nicht gebrochen!* Unsere Lichtquellen mit Blenden, ferner Kerzen und andere Gegenstände, beispielsweise stehende Pfeile, müssen in entsprechender Höhe angeordnet werden. Der Maßstab auf dem oberen Lineal läßt die Abstände bequem ablesen.

Die sechs Grundformen der Linse



Sammellinsen



Zerstreuungslinsen

Linsen, die in der Mitte am dicksten sind (nach außen gewölbt), sind *Sammellinsen* (Vergrößerungslinsen), weil sie die einfallenden Strahlen (im Brennpunkt) sammeln. Sie vereinigen im Brennpunkt F nicht nur Licht, sondern auch Wärme; Sonnenstrahlen können mit ihnen Brennbares zum Brennen bringen – daher der Name Brennpunkt. Der Abstand zwischen F und der Linsenmitte ist die Brennweite f ; sie ist um so kleiner, je größer die Wölbung der Linse ist. Wir kommen meist mit Brennweiten $+3, 4, 5, 6, 12$ und 30 cm aus; am wichtigsten sind die kleinen. (+ bedeutet Sammellinse oder Konvexlinse, vom lateinischen *convexus* = gewölbt und *convēhere* = zusammenlaufen.)

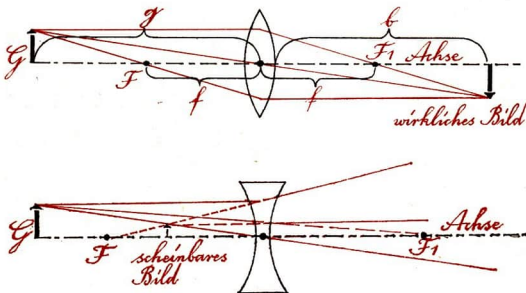
Zerstreuungslinsen (Verkleinerungslinsen) sind in der Mitte am dünnsten, nach innen gewölbt; sie zerstreuen die einfallenden Lichtstrahlen. Sie heißen auch Konkavlinen (nach dem lateinischen *concāvus*, gewölbt). Wir benötigen sie bis -12 cm Brennweite. Das Minuszeichen bedeutet konkav.

Das Gesetz der Linse

Sammellinsen geben ein wirkliches, umgekehrtes Bild B, das man mit Schirm oder Fotofilm auffangen kann – solange der Gegenstand G außerhalb der Linsenbrennweite bleibt. Ist G innerhalb von f , so ergibt sich ein aufrechtstehendes, scheinbares (nicht auffangbares) Bild von G. Die Linsengleichung heißt

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f};$$

g = Gegenstandsweite, b = Bildweite, f = Brennweite. Die beiden Zeichnungen zeigen, wie die Bilder entstehen: umgekehrt und wirklich oder aufrecht und nur scheinbar; aufrecht und wirklich – das gibt's nicht. Genug der Theorie!



Bildentstehung konvex und konkav

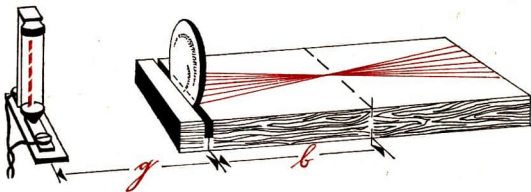
Wir experimentieren mit Linsen

Zuerst der *Brennpunkt F*; den müssen wir kennen! Die Sammellinse wird senkrecht ins Sonnenlicht gehalten; der Abstand zum Brennpunkt ist schnell gefunden.

Ist die Sonne untergegangen, legen wir unsere Leuchte mit der 3-Spalten-Blende auf die optische Bank. Die drei Strahlenbänder laufen in F (auf dem Schirm) zusammen; f ist in cm abzulesen. Ohne Leuchte mit parallelen Strahlen, nur mit einem gewöhnlichen Glühlämpchen, kann f mit der Linsengleichung bestimmt werden; wir müssen b und g messen, in die Gleichung einsetzen und nach f auflösen: $f = \frac{g \cdot b}{b + g}$. Hier ist g der Abstand Glühfa-

den-Linse, b der Abstand Linse-Punkt, in dem die aus der Linse kommen-





den Lichtstrahlen zusammenlaufen. Mit einer Soffittenlampe 6 Volt, einer weißen Schachtel und der mit Knetmasse befestigten Linse geht's auch. Nicht alle die möglichen Experimente, mit verschiedenen Linsen auf der optischen Bank die Abbildungen des Gegenstandes hervorzuzaubern, können hier aufgeführt werden; nach dem bisher Gebrachten ist das auch nicht mehr nötig. Als Gegenstand sei noch eine Blende mit ausgeschnittenem F empfohlen; der Buchstabe zeigt, ob Oben und Unten, Links und Rechts vertauscht sind. Und bei den Versuchen mit Sammellinsen stets bedenken: Alle zur Achse parallelen Strahlen werden auf der anderen Linsenseite zum Brennpunkt hin gebrochen; der Mittelpunktstrahl liegt sowieso – wie der Brennpunkt – auf der Achse, die allemal durch den Mittelpunkt der Linse geht. Ein Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite gibt ein wirkliches, verkleinertes Bild innerhalb der Brennweite (auf der anderen Seite der Linse; jede Seite hat ja einen Brennpunkt); umgekehrt: Ein Gegenstand zwischen einfacher und doppelter Brennweite ergibt ein wirkliches, bei entsprechender Einstellung sogar sehr stark vergrößertes Bild außerhalb der doppelten Brennweite. Steht der Gegenstand, etwa eine brennende Kerze, innerhalb der Brennweite, so kann die Linse die Strahlen nicht mehr sammeln; sie gehen auseinander (heller Fleck auf dem Schirm). Es entsteht, wie bei der Zerstreuungslinse, ein aufrechtes, scheinbares Bild; wir sehen es, wenn wir die Kerze durch die Sammellinse betrachten. Dann haben wir eine Lupe in der Hand!

Eine kleine historische Anmerkung: In Vorderasien hat man schon vor etwa zweieinhalb Jahrtausenden Linsen geschliffen. Um 1690 stellte der kurfürstlich-sächsische Rat Ehrenfried Walther von Tschirnhaus Linsen und Brennspiegel (Hohlspiegel) in Dresden her. Sein größtes, aus zwei Linsen im Holzrahmen zusammengesetztes Brennglas ist 2,23 m hoch; die Hauptlinse hat einen Durchmesser von 50 cm. Unten ist eine Haltevorrichtung für das Schmelzen von Metallen und das Brennen von Porzellan im Brennpunkt angebracht; bis 1700 °C wurden erreicht. Eine Sammlung solcher Geräte befindet sich im Mathematisch-Physikalischen Salon des Dresdner Zwingers.

Experimente mit Luft- und Wasserlinse

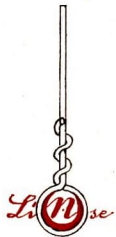
Ein weitsichtiger Mann saß einst vor seinem Glas mit hellem Bier. Er wollte auf seiner Uhr nachsehen, ob es Zeit sei, nach Hause zu gehen; aber er hatte seine Brille vergessen. Da hielt er seine Uhr in das Bier – und konnte die Uhrzeit gut ablesen. Wir nehmen unsere Uhr lieber nicht, auch wenn sie wasserdicht sein soll, und begnügen uns mit einem Bleistift, den wir in ein Glas Wasser halten. Der Stift wird vergrößert, denn Glas und Wasser bilden eine **Zylinder-Wasserlinse**, eine Sammellinse besonderer Art, ähnlich dem vergrößernden Längswulst auf Thermometer-Glasröhren.

Eine ähnliche Zylinder-Wasserlinse benutzten wir schon, um – zusammen mit Taschenlampe und Lochblende – einen schmalen Lichtstreifen zu erzeugen. Solche Zylinderlinsen (aber ganz aus Glas) werden bei der Aufnahme und Wiedergabe von Breitwandfilmen benutzt. Das Zylinderlinsen-System zerrt die Seiten des breiten Bildes (bei gleichbleibender Höhe) zusammen auf die Größe des alten Normalfilmes; das gleiche System entzerrt bei der Projektion im Kino auf die ursprüngliche Überbreite.

Ernst Zeier stellt eine hübsche Aufgabe: Man schreibe in senkrechten Druckbuchstaben zwei Zeilen untereinander: DIE HOHE EICHE und IM TIEFEN WALD! Durch eine waagerechte Zylinderlinse (Reagenzglas mit Wasser, verschlossen) in 2 bis 3 cm Abstand, parallel zur Schrift, läßt sich die erste Zeile tadellos lesen; die zweite indes steht kopf. Wie kommt das?

Im übrigen lohnt es sich, allerlei sonstige Glasgeräte aus dem Chemielabor mit Wasser zu füllen und zu durchstrahlen; die Wirkungen sind oft ebenso erstaunlich wie eindrucksvoll. Den Rekord an Einfachheit und Billigkeit hält eine Wasserlinse, die einfach ein Tropfen in einem kleinen Drahtring von 3 mm Innendurchmesser ist! Man wickelt einen Kupferdraht einmal um einen Stab gleicher Dicke und dreht ihn zusammen. Wird der Ring in Wasser getaucht und mit sanftem Schwung herausgezogen, bleibt in ihm durch Adhäsion und Oberflächenspannung (s. S. 103) ein Tropfen Wasser hängen, der als Sammellinse wirkt. Er vergrößert beim Durchblicken und zeigt beim Beleuchten einen deutlichen Brennpunkt. Durch vorsichtiges Antippen kann man den Tropfen so verkleinern, daß er die Form einer Konkavlinse annimmt und im Durchblick verkleinert. Eine Tropfenlinse, könnte man sagen.

Nun noch die Luftlinse! Wir bauen sie aus zwei gleich großen Uhrglaschalen des Chemikers. Eine Schale, Öffnung nach unten, auf Papier legen, mit Bleistift Rand anzeichnen; auf den so entstandenen Kreis (etwas mehr nach innen zu) einen dicken, gleichmäßigen Streifen Plastkleber (wasserfest) legen. Schalenrand in den Klebering tauchen und sofort wieder abheben, auf Wölbung beiseite legen. Mit der zweiten Schale geschieht das gleiche. Beide Ränder aufeinanderlegen; Kleber trocknen lassen. Dann eine größere Menge Kleber auf eine Stelle des Papieres geben und den Rand der „vorgeklebten“ Luftlinse hindurchziehen (senkrechte Linse langsam drehen); wieder trocknen lassen. Das gibt eine saubere, wasserdichte bikonvexe Luftlinse.



Ein Experiment zeigt schon die Eigenart der konvexen Luftlinse im Wasser. Die parallel hindurchgeschickten drei Lichtstrahlen gehen auseinander! Die Dichten der Medien liegen hier ja umgekehrt zueinander wie bei der Glas- oder Wasserlinse in Luft. Wer so geschickt ist, sich aus einem Plaststreifen, zwei Uhrglasschalen (mit der Wölbung nach innen) und Plastikleder eine bikonkave Luftlinse zu bauen, kann sich überzeugen, daß diese im Wasser als Sammellinse wirkt.

Wie wirken die Linsen in einigen Geräten

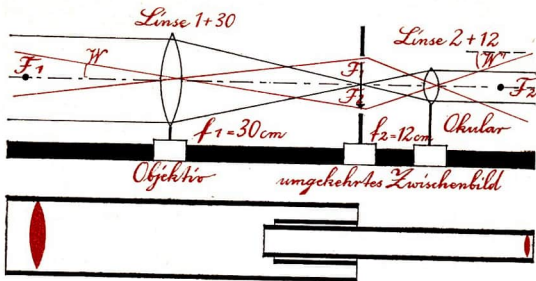


Die Fotokamera. Jeder weiß, daß eine Sammellinse – bei teureren Kameras ein sammelndes System – als „Objektiv“ von dem fotografierten Objekt ein verkleinertes, wirkliches, umgekehrtes Bild auf Mattscheibe oder Film innen an der Rückseite der Kamera entstehen läßt. Vor zwei Jahrhunderten warfen Maler auf ähnliche Weise mit einer Linse ein verkleinertes Bild auf ihren Arbeitstisch im verdunkelten Raum. Auch Bernardo Belotto, genannt Canaletto (1720 bis 1780), hat sich manchmal dieser „Malerkamera“ (camera obscura) bedient, beispielsweise bei einigen seiner Dresdner und Warschauer Stadtansichten.

Lupe und Fernrohr. Der Mensch will genauer und auch in die Ferne sehen! Genauer sehen: das bedeutet, das Objekt größer sehen. Scheinbar einfachste Lösung: Das Auge näher heranbringen; dadurch wird der „Sehwinkel“ vergrößert. Leider ist das nicht möglich, weil sich die Augenlinse nicht so stark krümmen kann; 20 bis 25 cm Abstand müssen normalerweise eingehalten werden. Wirkliche Abhilfe schafft die Lupe als Sammellinse, auch ein kleines Loch in der Postkarte, durch Verkürzung der Brennweite: Das Auge kann näher heran und sieht das Objekt vergrößert infolge des größeren Sehwinkels; das Objekt selbst behält seine alte Größe. Das Bild des Gegenstandes fällt im Auge auf eine größere Fläche der Netzhaut und damit auf eine größere Anzahl von lichtempfindlichen Zellen (Stäbchen und Zäpfchen), die den Lichteindruck vermitteln; das Bild wird nicht nur größer, sondern auch deutlicher, reicher in den Einzelheiten.

Bei den *Fernrohren* ist es grundsätzlich ebenso. Mit einer Sammellinse, f etwa 30 cm, ganz links auf unserer optischen Bank, erzeugen wir etwa 30 cm weiter rechts (genau einstellen!) ein verkleinertes, umgekehrtes Bild eines entfernten Gegenstandes – es darf auch der Mond sein! Die Linse heißt „Objektiv“, weil sie dem Objekt zugewendet ist. Dieses kleine Bild betrachten wir wie durch eine Lupe, eine vergrößernde zweite Sammellinse, f etwa 12 cm, die ebenso weit entfernt rechts vor der Mattscheibe sitzt. Sie heißt das „Okular“, weil sie dem Auge (lateinisch: *oculus*) am nächsten ist. Der rechte Brennpunkt des Objektivs und der linke des Okulars fallen (an der Mattscheibe) zusammen. Das Bild bleibt umgekehrt.

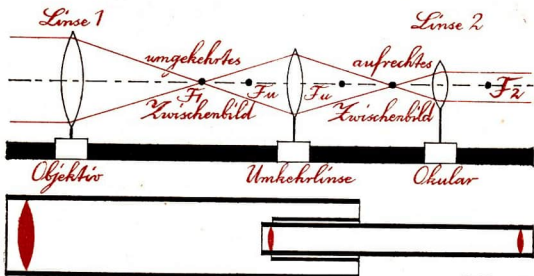
Bei Himmelsbeobachtungen stört das nicht; es heißt daher *astronomisches* oder *Himmelsfernrohr*. Johannes Kepler hat es 1611 als erster beschrieben, und Chr. Scheiner hat es 1615 gebaut; deshalb nennt man es auch das *Keplersche Fernrohr*. Wenn wir das Fernrohr mit zwei Papprohren bauen



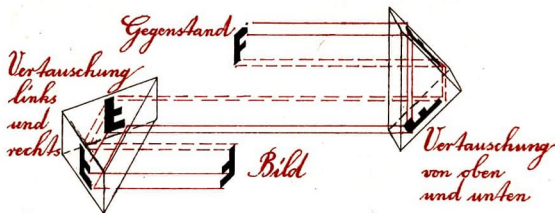
Himmelsfernrohr

(Okular mit einer einsteckbaren Röhre verschiebbar), entfällt die Mattscheibe. Bei einem Objektiv von +100 cm Brennweite (Brillenglas mit +1 Dioptrie D; D ist der Kehrwert der Brennweite, in Metern gerechnet) muß die große Pappröhre mindestens 1 m lang sein; die Okularlinse in der Einschiebröhre soll nicht unter 4 cm Brennweite haben. Das Mikroskop ist physikalisch die Umkehrung dieses Fernrohres.

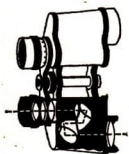
Auf der Erde (lateinisch: terra) braucht man ein *terrestrisches* oder *Erdfernrohr* mit aufrechtem Bild; andernfalls würde man wohl bald durcheinandergeraten. Der Ausweg liegt nahe: Man baut eine Umkehr-Sammellinse ein. Aber jetzt wird das Fernrohr gar zu lang, und man greift zu einem optischen Trick: Man jagt das Licht hin und her durch zwei total reflektierende Prismen, bis der Strahl die nötige Länge zwischen Objektiv und Okular hat; zugleich baut man die Prismen so listig zueinander ein, daß sie das Bild umkehren, also eine Umkehrlinse überflüssig machen. Damit haben wir das terrestrische Prismen-Fernrohr, wie es 1895 Carl Zeiss in Jena erstmalig baute.



Erdfernrohr

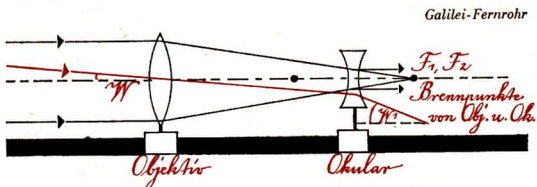


Umkehrung im Prismensystem



Das Holländische oder *Galileische Fernrohr* schließlich hat als Okular eine Zerstreuungslinse. Es liefert ein aufrechtes, scheinbares Bild, ist also ein ganz anderes System. Wir ersetzen die Okularlinse unserer Fernrohre jeweils durch eine Zerstreuungslinse gleicher, aber negativer Brennweite. Diese Linse muß nur näher am Objektiv sein: Ihr rechter Brennpunkt soll mit dem des Objektivs zusammenfallen. Die beiden Namen rühren daher, daß 1609 das erste Fernrohr mit zwei Linsen in Holland gebaut wurde. Galilei hörte davon und baute sofort ein Fernrohr mit einer Sammellinse und einer Zerstreuungslinse; er hat es dann verbessert und viele neue Entdeckungen in der Astronomie damit gemacht.

Nur noch eine Frage: Was geschieht, wenn ich beim Beobachten eine Hälfte des Objektivs zudecke?



Das Licht als Welle

Daß der Lichtstrahl seiner Natur nach nicht nur Teilchen, sondern auch Welle ist, haben wir schon auf Seite 274 erfahren. Der Wellencharakter des Lichtes wird uns gegen Ende unserer Reise durch die Physik zu einigen farbenprächtigen Experimenten verhelfen.

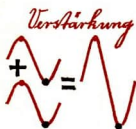
Von Farben, die man nicht in der Tüte kaufen kann

Es sind schon höchst merkwürdige Farben: Sie sind Wirklichkeit, denn wir können sie hervorrufen, sehen und mit ihnen experimentieren; wenn wir aber das Ding untersuchen, in dem sie entstehen, sind sie auch schon verschwunden. In der Farbenhandlung können wir sie nicht kaufen; wer aber mit offenen Augen durch die Welt geht, der findet sie immer wieder und hat seine Freude daran: an bunten Seifenblasen, auf der Ölhaut, die sich (für den Verkehr so gefährlich) auf einer Regenpfütze ausgebreitet hat, auf der noch regenfeuchten Windschutzscheibe eines Kraftwagens, auf herrlich bunt im Sonnenschein leuchtenden Flügeln eines Schmetterlings (überhaupt aller Insekten, deren Flügel aus zwei Schichten bestehen), an einigen Aquarienfischen, an Perlmutterschmuck und nicht zuletzt als Anlaßfarben auf erhitztem Stahl.

Das sind nur einige Beispiele, aber sie zeigen schon das Wichtigste: Immer sind da ganz winzig dünne Schichten, und man muß so schräg draufschauen, als wolle man die Sonne (oder eine andere Lichtquelle) im Spiegel sehen. Wir kennen das ja: Einfallswinkel gleich Ausfallwinkel! Ändert sich die Schichtdicke oder unser Blickwinkel, so ändern sich die Farben (manchmal auch die Form) oder verschwinden ganz.

Das Neue für uns ist: Diese Schichten müssen dünner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes sein — die aber beträgt nur zwischen $4 \cdot 10^{-4}$ und $7 \cdot 10^{-4}$ mm! Mit gewöhnlichen Werkzeugen lassen sie sich nicht herstellen;





Interferenz



So entstehen die Farben dünner Schichten



Zwei Wellen gleicher Amplitude und Frequenz ergeben bei Überlagerung mit Phasenverschiebung eine dritte mit anderer Amplitude

aber wenn man die Naturgesetze kennt, kann man die Natur anregen, solche Schichten zu erzeugen (wenn sie es nicht schon von selber tut, wie bei den Schmetterlingen). Mit bloßem Auge sehen können wir so winzige Dicken nicht – und die Lichtwellen ja sowieso nicht. Also müssen wir wieder scharf nachdenken und experimentieren.

Was wir noch dazu wissen müssen, kennen wir schon: die Brechung und (vor allem) die Reflexion der Lichtstrahlen; beim „Lichtstrahl“ denken wir stets daran, daß er nur eine notwendige gedankliche Vereinfachung eines Bündels von Welle- und Teilchen-Strahlen ist, ein „Modell“, mit dem es sich leichter arbeiten läßt. Ohne das kommt die Wissenschaft nicht aus; dabei geschieht es denn auch des öfteren, daß ein zunächst erfreulich einfaches Modell mit den wachsenden Erkenntnissen immer verwickelter wird (das Modell des Atoms ist ein Beispiel dafür).

Ein Drittes und Letztes ist die Überlagerung von Wellen. Rundfunk und Fernsehen, die ja auch mit elektromagnetischen Wellen arbeiten, brauchen sie ebenfalls. Sehr gut ist die Erscheinung bei Wasserwellen zu beobachten: Wenn Wasserwellen an eine senkrechte Ufermauer schlagen, so werden sie reflektiert und „überlagern“ dabei die neu ankommenden Wellen von gleicher Wellenlänge. Kommt immer gerade ein „alter“ Wellenberg auf einen „neuen“, so addieren sie sich zu doppelter Höhe (Amplitude); die beiden zusammenfallenden Täler ergeben ein doppelt tiefes Tal. Treffen die zurücklaufenden Wellen mit einer Verschiebung von einer halben Wellenlänge auf die heranrollenden, dann fällt stets ein Wellenberg mit einem Wellental zusammen, und beide heben einander bei der Addition auf. Die Wasseroberfläche wird plötzlich glatt! Im ersten Extremfall denkt man, ein Sturm sei ausgebrochen – im zweiten, eine Windstille sei eingetreten. Dazwischen liegen unendlich viele Zwischenwerte der „Phasenverschiebung“ beider Wellenzüge zueinander. Sie ergeben viele verwickelte Wellenformen.

Entsprechend ist es mit dem Licht. Mit zwei Lichtwellenzügen einer einzigen Wellenlänge kann man sogar Dunkelheit erzeugen! Sie müssen nur „kohärent“ sein, das heißt, von derselben Lichtquelle stammen; die eine elektromagnetische Welle trifft nach einem Umweg, der eine Phasenverschiebung verursacht, mit der schon an der Oberfläche einer sehr dünnen Schicht reflektierten Welle zusammen. Beide haben (da sie Teile einer einzigen Welle sind) die gleiche Wellenlänge; nun beeinflussen sie einander durch Überlagerung, und es entstehen je nach der Größe der Phasenverschiebung helle und dunkle sowie farbige Bereiche.

Die Sonne scheint auf einen Ölfleck. Ein Teil des Lichtes wird von dessen Oberfläche sofort zurückgeworfen; ein anderer Teil dringt durch die sehr dünne Ölschicht auf deren Unterseite und wird reflektiert. Dieser zweite Strahl trifft mit „Verspätung“ auf den ersten und überlagert ihn. Wenn das Licht nur eine Wellenlänge hat, entstehen abwechselnd helle und dunkle Gebiete. Ihre Anordnung hängt von der Dicke des Häutchens ab. Weißes (nichtfarbiges) Licht besteht aber aus mehreren Farben, die einander zu weißem Licht ergänzen. Jede Farbe hat eine bestimmte Wellenlänge (rot die längste, violett die kürzeste).

Die Ölschicht ist nun nicht überall gleich dick — wie auch alle anderen hier erwähnten dünnen Schichten. Infolgedessen werden an den einzelnen Stellen verschiedene Phasenverschiebungen entstehen und nur einige der Farben des Lichtes jeweils geschwächt oder verdunkelt. Da die Strahlen parallel im Auge ankommen, gelangen sie durch die Augenlinse auf dieselbe Stelle der Netzhaut. Wir sehen eine Vielfalt von Farben. Sie ist dadurch entstanden, daß die zum weißen Licht jeweils fehlende Wellenlänge durch Überlagerung ausgelöscht oder geschwächt worden ist. Ist beispielsweise aus dem weißen Sonnenlicht die der grünen Farbe entsprechende Wellenlänge ausgelöscht oder wesentlich geschwächt, so ergeben die übriggebliebenen Farben die Mischfarbe rot. Der Physiker nennt diese Erscheinung Interferenz (vom lateinischen *interferre* = dazwischentragen, einmengen). Jede Farbe auf der dünnen Schicht kennzeichnet also eine bestimmte Schichtdicke.

Wir lassen dünne Schichten leuchten

Am einfachsten und schönsten geht's mit einem kleinen Tropfen eines leichtflüssigen Öles am Ende eines Drahtes (Fahrradöl, Maschinenöl, Terpentinöl, Olivenöl, Salatöl u. a.). Eine fettfreie Schale (z. B. ein Teller) wird mit Wasser gefüllt; das ganz kleine (!) Öltröpfchen wird auf die Wasseroberfläche gesetzt. Wenn es wenig genug war, breitet sich das Öl schnell (bei Oliven- und Fahrradöl) oder langsam (bei Maschinen- und Terpentinöl) aus und zeigt herrlich leuchtende Farben. Bei bewegter Wasseroberfläche ändern sich die Ölschichten und damit die Farben.

Dauerhafte farbige Schichten lassen sich mit ein paar Tropfen eines in Azeton (durch den scharfen süßlichen Geruch erkennbar) gelösten Plastklebers herstellen. Zwei oder drei Tropfen Plastkleber kommen auf einige Milliliter Azeton; die Konzentration muß ausprobiert werden. Ein winziges Tröpfchen der Lösung ergibt auf dem Wasser die gewünschte Wirkung. Das Azeton verdunstet, und die farbige Schicht kann mit schwarzem Papier oder mit einer Glasscheibe vorsichtig von unten angehoben und sogar nach dem Trocknen aufbewahrt werden (wenn sie so eindrucksvoll ausgefallen ist, daß es sich lohnt).

Mit *Seifenhäutchen* wissen wir Bescheid (s. S. 107!). Schon die gewöhnlichen Seifenblasen sind dünn genug, um schöne Interferenzfarben zu zeigen — zur Freude der Hausfrau auch beim Aufwaschen des Geschirrs. Wir biegen aus dünnem Draht einen Kreisring mit etwa 3 cm Durchmesser (mit verdrehtem Griff). Der mit etwas Benzin entfettete Ring wird in eine Seifenlösung getaucht und senkrecht herausgezogen; auf dem Seifenhäutchen (Seifenlamelle) zeigen sich die bekannten Interferenz-Mischfarben. Und jede von ihnen ist weißes Licht, dem die Wellenlänge fehlt, die just an dieser Stelle durch Interferenz ausgelöscht wird.

In einfarbigem Licht, beispielsweise (gelbem) Natriumlicht, ist noch folgendes zu sehen (die Lampe soll sich in dem senkrechten Seifenhäutchen spiegeln): Die Seifenlösung sinkt langsam nach unten, die Lamelle wird oben dünner und unten immer dicker. Dadurch entstehen oben waagerechte

helle und dunkle Streifen, die sich nach unten hin verbreitern. Schließlich entsteht oben ein schwarzer Fleck als Zeichen, daß die Schichtdicke nahe am Wert Null ist, und kurz danach reißt das Häutchen dort ab.

Das *Natriumlicht* erhält man für kurze Zeit durch Einstreuen von Salz in eine Gasflamme (Bunsenbrenner) oder Spiritusflamme; länger andauernd dadurch, daß man ein wenig Kochsalz auf eine kleine Drahtschlinge (am besten aus Platin, aber Eisen oder Zink genügt auch) streut und sie in die Flamme ragen läßt. Kochsalz am angefeuchteten Ende eines Magnesiastäbchens bringt auch Erfolg. In solchem einfarbigen (monochromatischen) Licht lassen sich auch die übrigen Versuche mit dünnen Schichten mit neuen, sehenswerten Ergebnissen durchführen. Weitere Variationen mit einfarbigen Scheiben (rot und grün) vor der Lichtquelle (Taschenlampe) seien ebenfalls empfohlen.

Anlaßfarben (Anlauffarben) entstehen und bleiben der Reihe nach, wenn wir eine fettfreie Rasierklinge mit einer Seite an den Rand einer Kerzenflamme halten; hellgelb – dunkelgelb – braun – braunrot – rot – violett – dunkelblau – hellblau; sie kennzeichnen die jeweilige Temperatur des erhitzten Metalls (zwischen 200 °C und 310 °C). Die Farben müssen von innen zum Rand hin abgelesen werden, weil hier die größte Hitze herrschte! Sie entstehen durch Interferenz an verschiedenen dünnen Oxidschichten, die beim Erhitzen gebildet werden, und sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Temperaturmessung beim Anlassen unlegierter und niedriglegierter Stähle.

1665 veröffentlichte der englische Naturforscher Robert Hooke (1635 bis 1703) seine optischen Untersuchungen an dünnen Schichten; er hatte den Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Farbe schon erkannt, aber die allgemeingültige Erklärung noch nicht gefunden. Bald danach erweiterte Newton diese Versuche (u. a. an zwei Prismen, die mit ihren größten Flächen aneinander lagen) und führte auch Messungen durch. Nach ihm sind die *Newtonschen Ringe* benannt.

Sie entstehen durch Aneinanderdrücken zweier spiegelglatter Glasflächen; die dabei bestehende winzige Luftschicht zwischen den Gläsern bildet als dünne Schicht die Interferenzfarben – bei gleichmäßigem Flächendruck in Form von gleichmittigen Ringen. Man ist aber großzügig und zählt auch andere Formen, Halbkreise und unregelmäßige Figuren, zu den „Ringen“. Wer selbst fotografische Vergrößerungen anfertigt, hat sie schon gewünscht, wenn sie – trotz aller Schönheit – störend zwischen Film und Glasführung im Vergrößerungsgerät ebenso wie bei Dias auftreten. Sehr willkommen sind sie dagegen bei der Prüfung von Linsensystemen. Die Farben dünner Schichten sind eine Grundlage für das Messen von Schichten sehr geringer Dicke.

Wir nehmen zwei sehr glatte Glasscheiben, am einfachsten Diagonalgläser, säubern sie mit Spiritus so liebevoll wie eine gute Hausfrau ihre Repräsentations-Weingläser, so daß kein Stäubchen oder Fussel darauf bleibt, legen sie aufeinander und drücken sie auf mindestens zwei gegenüberliegenden Stellen aufeinander. Die Gläser biegen sich ein wenig durch; der winzige Luftzwischenraum erhält eine Keilform – eine Voraussetzung für die Farben. Schräges Licht und schräger Blick wie immer bei diesen Versuchen –



Newtonsche Ringe

und wir sehen die bunten Ringe. Manchmal dauert's etwas länger, ehe man Erfolg hat; aber wir wissen ja, daß Geduld zur Optik gehört. Übrigens kann man mit dem (ablaufenden oder sanft abgewischten) Spiritus auf einem Glas auch Farben erzeugen, die sich mit der Verdunstung verändern und schließlich verschwinden.

Ist das Naturgesetz unzuverlässig?

Nein, das ist es gewiß nicht. Es scheint zwar manchmal so – wie beim Wasser, das bei 4°C seine größte Dichte hat, oder bei Metallen, die in der Nähe des absoluten Temperatur-Nullpunktes (um -273°C) plötzlich „supraleitend“ werden, das heißt ihren elektrischen Widerstand verlieren –, aber dann werden andere Naturgesetze zusätzlich wirksam; dadurch entstehen solche „Sprünge“. Aber etwas anderes haben die Physiker in steigendem Maße erkannt: Man muß außer dem Gesetz auch den *Bereich* kennen, in dem es wirkt. In der Physik der kleinsten Teile (Mikrophysik, Atomphysik) läuft manches anders ab als in der Physik der großen Teile (Makrophysik), wie sie in unserem täglichen Leben vorkommen. Die Dinge verhalten sich auch bei extremen Geschwindigkeiten (etwa Lichtgeschwindigkeiten) anders als bei irdischen. Die neuzeitliche Physik mit ihren ständig verbesserten Verfahren, Maschinen und Geräten hat neue Bereiche erschlossen; neue Denkweisen – Beispiele sind die Relativitätstheorie und die Quantentheorie – haben weitere Erkenntnisbereiche geöffnet, die auch schon vielfach in der Technik angewendet werden. Die „klassische“ Physik – bis Ende des 19. Jahrhunderts gerechnet – ist dadurch nicht entwertet, wohl aber als „Sonderfall unter irdischen Verhältnissen“ erkannt worden.

Das Licht geht manchmal krumme Wege

Manchmal – das heißt wieder: unter bestimmten Voraussetzungen, in bestimmten Bereichen!

Beugung am Zwirnsfaden ...

Wenn wir zwischen uns und eine Lichtquelle einen schmalen senkrechten Streifen Pappe halten, so sehen wir diesen Streifen vor uns, der in bekannter Weise (geometrisch nachzuzeichnen, s. S. 280) seinen Schatten wirft: geradlinige Fortbewegung des Lichtes. Nun halten wir einmal einen gespannten Zwirnsfaden senkrecht etwa 50 cm und dann langsam immer dichter vor das Auge – gegen den hellen Himmel etwa. Das Ergebnis verblüfft: Wir sehen in wachsender Zahl helle und dunkle Streifen im Schatten des Fadens!

Offensichtlich ist Licht von den Seiten in den Schatten eingedrungen und hat sich hier überlagert; der Wellencharakter der Lichtstrahlen macht das

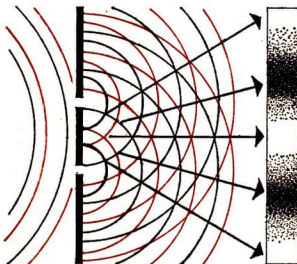
möglich. Sie müssen, wie schon erwähnt, unbedingt von einer einzigen Lichtquelle stammen, „kohärent“ sein (vom lateinischen *cohaerere* = zusammenhängen). Unter diesen Voraussetzungen (kohärente Lichtstrahlen und sehr dünner Faden) hat sich das Licht auf einem bogenförmigen Weg zum Schatten hin gebeugt; man spricht daher von einer *Beugung der Lichtstrahlen*. Treffen dabei zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler aufeinander, so addieren sie sich zu größerer Helligkeit: das sind die hellen Streifen. Trifft ein Wellenberg auf ein Wellental des anderen Strahles, so löschen sie einander aus; das sind die dunklen Interferenzstreifen. Beim ersten Dunkelstreifen sind beide Lichtwellen um eine halbe Wellenlänge, beim zweiten um $3/2$ Wellenlängen gegeneinander verschoben und so fort. Der Teilchencharakter des Lichtstrahles wirkt sich bei diesem Versuch nicht aus; kein Wunder, daß die Forscher zunächst nur an die Welle glaubten!

... und am Spalt

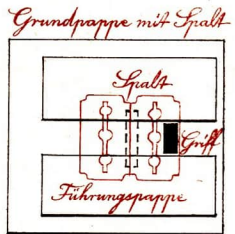
Wieder die Sache mit den Bereichen: Solange ein Spalt groß genug ist – etwa wie bei unseren Blenden auf Seite 276 –, gehen die Lichtstrahlen ungestört geradlinig hindurch. Nähert sich jedoch die Spaltbreite dem Bereich der Lichtwellenlänge und beträgt sie nur noch Bruchteile eines Millimeters, so wird ein Teil des durchgehenden Lichtbündels gebeugt (seitlich mehr oder weniger abgelenkt).

Christian Huygens erkannte schon 1678: Um jeden Punkt eines Mediums, das von einer Welle erreicht wird, bilden sich neue kreisförmige Wellen, die „Elementarwellen“. Dieses *Huygenssche Prinzip* gilt für alle Wellenarten (auch Wasser- und Luftwellen). Die Lichtwellenfront, die (aus nur einer Quelle!) an den schmalen Spalt gelangt, setzt sich auf der anderen Seite des Spaltes als eine Reihe von neu entstandenen Wellen fort; es gelangt ja immer noch ein Strahlenbündel durch den Spalt. Diese neuen Lichtwellen überlagern einander, und es entstehen wieder Interferenzen: dunkle und helle Streifen. Unser Bild zeigt in Draufsicht, wie der englische Physiker und Arzt Thomas Young (1773 bis 1829) sein Experiment zum

Entstehung der
Interferenzstreifen



310



Nachweis des Wellencharakters des Lichtes durch Interferenz aufgebaut hat: Er ließ Licht auf zwei kleine Löcher in einer undurchsichtigen Platte fallen. Am Beispiel der zwei gezeichneten Elementarwellen kann man die Überlagerungen erkennen; Tal auf Tal und Berg auf Berg ergeben Helligkeit, Berg auf Tal löscht das Licht aus. Auf dem (umgeklappten) Schirm rechts ist das Ergebnis angedeutet.

Der Spalt läßt sich auf vielerlei Art herstellen. Ein 2 bis 3 cm langer Schnitt mit einer scharfen Klinge (Taschenmesser, Radiermesser, Rasierklinge) in ein Stück dunkles, festes Papier oder Stanniol, senkrecht ans Auge gehalten, zeigt schon deutlich die Interferenzstreifen; wir schauen dabei gegen den hellen Himmel oder genau auf den hellen Leuchtfaden (in seiner Länge, parallel zum Spalt) einer Glühlampe 40 oder 60 Watt. Eine weitere Möglichkeit, feine Spalte herzustellen: Eine Seite eines sauberen Diagläschens wird über der Kerzenflamme gleichmäßig und so dünn wie möglich (so daß die Flamme gerade nicht mehr durchscheint) beruht. Mit der freien Seite auf den Tisch legen, abkühlen lassen, an zwei gegenüberliegenden Seiten je ein Lineal oder ähnliches anlegen, darüber ein festes Metall-Lineal. An diesem fährt man locker und schnell mit dem Schneidende einer Rasierklinge entlang, die am besten in einer Papphülle steckt. Einige Doppelspalte schneiden wir auch; die Klinge wird erst senkrecht und sofort danach mit ganz geringer Neigung geführt. Es liegt nahe, die empfindliche Rußschicht durch ein zweites Gläschen zu schützen; dann ist ein Zwischenrand zu empfehlen, weil die feinen Spalte von einigen hundertstel Millimetern (Rasierklingendicke etwa 0,07 mm!) leicht zerdrückt werden.

Am schönsten und leichtesten arbeitet es sich mit einem verstellbaren Spalt aus zwei Rasierklingen (rechte Abbildung auf Seite 310).

Aus einer etwa 2 mm dicken Pappe wird ein 10 mm breites und 20 mm langes Rechteck herausgeschnitten. Rasierklinge 1 kleben wir mit Plastkleber so auf, daß die Mitte der Schneide (20 mm) 4 mm über den Ausschnitt ragt. Oben und unten am Ausschnitttrand wird je eine Führungspappe so festgeklebt, daß sich die von der anderen Seite kommende Rasierklinge 2 darunter verschieben läßt, aber an jedem Platz straff genug festgehalten wird. Die Klinge erhält auf der Mitte einer Längsseite das herausgeschnittene Papprechteck als Griff (Plastkleber!) und wird zur Klinge 1 hin eingeschoben. Damit können wir jede in Betracht kommende Spaltbreite leicht einstellen, ja sogar messen – wenn wir eine oder mehrere Klingen bekannter Dicke zum Einstellen des Abstandes zwischen 1 und 2 halten! Man kann bei einiger Geschicklichkeit die Spaltbreite auch während der Beobachtung gleitend und parallel verändern; wer will, mag sich dafür eine besondere Vorrichtung mit zwei Hebeln basteln.

Mit gleitend veränderter Spaltbreite läßt sich besonders gut der Lampen-Glühfaden beobachten: Es entstehen auch Interferenzfarben, denn die überlagerten Wellen sind ja nicht nur um die halbe Wellenlänge und die Vielfachen davon gegeneinander verschoben; wir haben hier das Gegenstück zu den Farben dünner Blättchen, deren verschiedene Dicke ja verschiedene Interferenzfarben bewirken. Alles sind Mischfarben, keine Spektralfarben, die, wie wir wissen, durch Dispersion entstehen! Wir wollen so



*Interferenzstreifen
am Spalt*

viele Variationen wie möglich machen, um Neues zu entdecken; mit Vorsicht dürfen wir auch mit ganz engem Spalt in die schwächer gewordene Abendsonne schauen. Ob wir da auch Interferenzfarben entdecken?

Der Regenschirm als Beugungsgitter

Wer spannt schon bei Sonnenschein seinen schwarzen Regenschirm auf? Wir tun es und schauen durch das feine Gewebe auf die Morgen- oder Abendsonne (nachts ersetzt die Straßenleuchte die Sonne nur mangelhaft).

Der Anblick ist verblüffend! Der gitterartige Stoff beugt das Sonnenlicht in viele einzelne Wellen, die durch Überlagerung alles bieten, was wir uns wünschen können: Streifen und wunderschöne Farben, und alles gitter- und kreuzförmig angeordnet. Solche „Kreuzgitter“-Gewebe gibt es in Seide und Chemiefaser. Da ein Regenschirm für optische Experimente etwas unhandlich ist, besorgen wir uns Stücke geeigneter Stoffe in einem Schirmgeschäft und fassen sie in der Art von Diapositiven zwischen Glasplatten. Dabei sollen die Fäden und Punktreihen parallel zu den Glasrändern laufen. Vogelfedern bilden schräge Kreuzgitter. Selbstanfertigung – etwa zwei Liniengitter im Ruß senkrecht übereinandergelegt – ist nicht zu empfehlen. Stoffe haben bis 50 Fäden auf 10 mm!

Beim Experimentieren mit verschiedenen Gittern und Lichtquellen benutzen wir auch Farbschichten (rot, grün, blau, gelb) einzeln und in der Zusammenstellung halb grün und halb rot und vergleichen die Ergebnisse. Je kleiner die Wellenlänge ist, desto kleiner ist ihr Abstand.

Brillenträger können sich jetzt den merkwürdigen nächtlichen Anblick der Straßenbeleuchtung durch die beschlagene Brille richtig erklären. Der Schliff der Gläser macht das Ganze noch merkwürdiger. Ein Blick durch eine beschlagene Fensterscheibe zeigt die Beugungseffekte ebenfalls. Die sehr dicht nebeneinanderliegenden winzigen Wassertröpfchen ergeben die geeigneten Hindernisse. Die „Höfe“ um Sonne und Mond entstehen auf die gleiche Weise in einer hohen Wolke aus sehr kleinen Wassertröpfchen; sie werden daher mit Recht als Vorboten für schlechtes Wetter gedeutet. Farbige Ringe um Sonne und Mond hingenen (innen rot, außen blau) sind auf Dispersion des Lichtes in den kleinen Eiskristallen zurückzuführen, die sich bei der Kondensation des Wasserdampfes in höchsten Luftschichten bilden. Die weißen Ringe (Halo) entstehen durch Reflexion des Sonnen- oder Mondlichtes an den Flächen dieser Eiskristalle (auch „Nebensonnen“ und „Nebenmonde“).

Himmelblau, Morgen- und Abendröte

Das Sonnenlicht wird in unserer Atmosphäre durch Beugung an in der Luft schwebenden Staubteilchen und anderen (leider immer reichlicher werdenden) Verunreinigungen, die kleiner als die Wellenlängen sind, gestreut – ebenso durch Wasserdampf- und Luftmoleküle. Hätten alle Farben, aus

denen sich das weiße Licht zusammensetzt, die gleiche Wellenlänge, so würden sie gleich stark abgelenkt; der Himmel sähe von morgens bis abends weiß aus (was schon auf Ansichtskarten nicht gut wirken würde). Nun ist aber die Streuung bei dem kurzwelligen Blau etwa 16mal stärker als bei Rot mit der doppelten Wellenlänge; dadurch werden die kurzwelligen Farben für uns als (gestreutes) blaues Himmelslicht sichtbar. Es ist um so tiefer blau, je trockener die Atmosphäre ist. Daß der Himmel tagsüber auch dort hell erscheint, wo die Sonne nicht steht, ist ebenfalls auf die Streuung zurückzuführen.

Bei Sonnenaufgang und -untergang wird der Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre viel länger. Durch die Streuung geht, wie erwähnt, vor allem blaues Licht verloren; das längerwellige rote Licht dagegen gelangt als Morgen- und Abendrot zu uns. Dieses langwellige Rot dringt überhaupt besser durch – aus diesem Grunde sind die Sperrleuchten rot! Mit Ultrarot kann man sogar durch Nacht und Nebel hindurchfotografieren. Außerhalb der Atmosphäre gibt es kein gestreutes Licht; der Kosmonaut sieht nur die schwarze Leere des Weltraumes, vom Licht der Sterne unterbrochen.

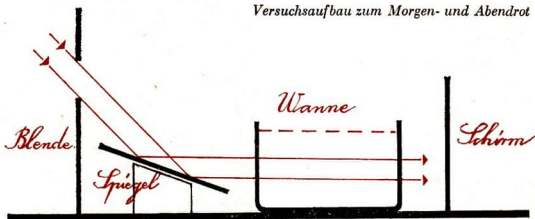
Die Stärke des Sonnenlichtes wird bei dem langen Weg morgens und abends durch Streuung und die genannten Teilchen in der Luft so sehr geschwächt, daß man die Sonnenscheibe am Horizont ohne Gefahr für die Augen anschauen kann – für manche Experimente vorteilhaft.

Wir lassen Morgen- und Abendröte entstehen

Dieses Experiment ist schon um die letzte Jahrhundertwende von Bernhard Schwalbe und Hermann Hahn angegeben worden. Die Atmosphäre wird durch Wasser in einem Glastrog dargestellt, die Verunreinigungen durch ausgefällte winzige Schwefelteile; ein Sonnenlicht-Strahlenbündel wird – mit Hilfe einer Blende und eines Spiegels – durch den Trog (der Länge nach) bis zu einem weißen Schirm hindurchgeleitet. Also Modelldarstellung mit echter Lichtquelle! Ein verdunkeltes Zimmer läßt die Erscheinungen noch deutlicher erkennen.

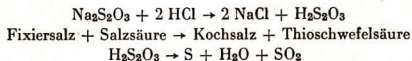
Wir lösen gewöhnliches Fixiersalz (Natriumthiosulfat) in Wasser (etwa 10 g je Liter) und füllen diese Lösung in ein Glasgefäß (beispielsweise unser be-

Versuchsaufbau zum Morgen- und Abendrot























währtes Aquarium oder eine große Kuvette); das Aquarium wird bis wenige Zentimeter unter den Rand gefüllt. Während das Licht hindurchscheint und das ganze Wasser farblos erleuchtet, gießen wir langsam verdünnte Salzsäure oder Schwefelsäure hinzu (Vorsicht, Säure ätzt!). Zuerst mit wenig Säure versuchen! Umrühren. Allmählich fällt Schwefel aus. Wir beobachten zuerst einen bläulichen Farbton (Himmelsblau); dann entsteht gelblich-rötliches Licht, vor allem in dem der Lichtquelle abgewendeten Teil des Wassers (die Abendröte beginnt). Mit der wachsenden Zahl der Schwefelteilchen verschwindet das Blau allmählich, und der Sonnenstrahl erscheint tiefrot (Sonnenuntergang). Für die Chemiker sei hier die Gleichung der chemischen Umsetzung verraten:



Wer den chemischen Aufwand vermeiden will, gibt allmählich etwas Milch in das Wasser – beim Aquarium sind einige Milliliter nötig. Umrühren, um die „Verunreinigungen“ zu verteilen. Der Versuch ist auch im dunklen Zimmer mit einer starken Taschenlampe oder ähnlichen Lichtquellen möglich; aber die Farben kommen nicht so schön wie bei weißem Sonnenlicht heraus (Glühfäden geben gelbliches Licht).

Der geistige Nachtsch: Optische Täuschungen

<i>Anfangsstellung</i>			
<i>Radsstellung nach 1. Bildpause</i>			
<i>nach 2. Bildpause</i>			
<i>nach 3. Bildpause</i>			
<i>nach 4. Bildpause</i>			
<i>Gesamteindruck</i>			

Räder im Kino

1. Fall 2. Fall 3. Fall

„Täuschung“ ist kein sehr glücklicher Ausdruck für das, was wir damit in der Optik meinen; er klingt so nach Betrug. Ein Naturgesetz hat an sich mit menschlichem Verhalten nichts zu tun; das kommt erst hinzu, wenn der Mensch das Gesetz für seine Zwecke ausnutzt – ob er etwa Atomkernenergie in Bomben für Kriegszwecke einsetzt oder in Kernkraftwerken für friedliche Zwecke zum Nutzen der Menschheit. Die optischen Gesetze führen dagegen beim uneingeweihten Beobachter leicht zu Fehlschlüssen, zu Irrtümern. Kein anderes Gebiet der Physik führt den Ahnungslosen so sehr an der Nase, besser: am Auge herum! Wir haben das hier selber, beispielsweise beim Spiegel, kennengelernt. Die Optik des Auges hat allerlei Mängel, und das gedankliche Verarbeiten des Geschauten führt auch oft zu Fehlschlüssen; der geometrische Aufbau des Bildes täuscht ebenfalls nicht selten. Sehen wir uns einige solche Fälle an! Nur zum ersten Beispiel soll noch eine kurze Erläuterung gegeben werden.

Sich schnell drehende Speichenräder an Wagen oder Maschinen scheinen bei der Wiedergabe im Film stillzustehen, nur langsam vorwärts oder gar rückwärts zu laufen – je nachdem, wie weit sich das Rad in einer Bildpause (die unser träges Auge ja nicht merkt) bewegt hat.

Im ersten Fall vollführt das Rad während einer Bildpause eine ganze Zahl von Umdrehungen, im zweiten Fall etwas mehr und im dritten Fall etwas weniger als eine ganze Zahl.

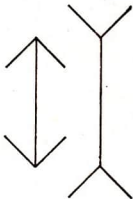


Welche Kreisfläche ist größer?



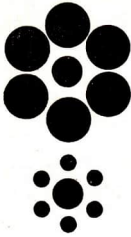
Ist die obere Figur kleiner als die untere?

Welcher Stab (zwischen den Pfeilen) ist länger?



So können Streifen täuschen!





*Die beiden inneren Kreise
sind aber doch gleich!*



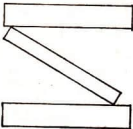
*Wie steht's mit diesen
schwankenden Geraden?*



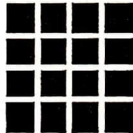
Wer ist der längste Mann?



*Welches Haus ist breiter?
Auch die Mode muß
das beachten,
wenn sie dicke Leute
schlank und dünne
ansehnlicher machen will*



Sind die Streifen gleich lang?



*Etwas für Hausfrauen:
Sind die Kreuzungsflächen
wirklich schmutzig?*



*Der Kamm ist ebenso breit wie hoch! Eine Senkrechte,
30 cm hoch, mitten auf einer ebenso langen
Waagerechten, erscheint ebenfalls länger. Der Augapfel
bewegt sich leichter seitlich als auf- und abwärts*



*Wird dieses Bild langsam
kreisend bewegt, so scheinen
sich die Kreise rechtsherum
und das Zahnrad links-
herum zu drehen*



Sehen Sie nacheinander zwei Bilder?

Zum Schluß wollen wir auf besondere Art den Teufel an die Wand malen (er verschwindet bald wieder von selber)! Wir betrachten sein hell beleuchtetes Bild hier etwa 30 Sekunden, die Augen scharf auf den schwarzen Gürtel gerichtet. Dann schauen wir sofort auf die helle Wand (oder Decke). Nach einigen Sekunden erscheint dort seine finstere, das heißt: dunkle Gestalt!

Malt man die Zeichnung in Rot auf weißes Papier und wiederholt damit den Versuch, so erscheint der Teufel in Grün an der Wand. Das können wir mit allen möglichen Zeichnungen und Farben beliebig fortsetzen.

Es sind *Nachbilder*, die man auch mit hellen Fenstern erleben kann. Das weiße Licht wirkt sehr stark auf die Netzhaut, die schwarze Umrandung tut das viel weniger. Die vom hellen Teil getroffenen Sehnerven im Auge ermüden daher entsprechend stärker als die anderen. Schauen wir schnell auf die Wand, so brauchen die ermüdeten Nervenenden einige Zeit zur Erholung, während die wenig ermüdeten die helle Wandfläche sofort weiterleiten. Auf diese Weise entsteht das umgekehrte (negative) Nachbild. Es verschwindet, sobald sich die ermüdeten Netzhautteile wieder erholt haben. Bei der Farbe entsteht im Nachbild auf diese Weise die Ergänzungsfarbe (Komplementärfarbe).

Mit diesem wahrhaft „teuflischen“ Versuch schließen wir auch die Reihe unserer Experimente aus der Wellenoptik.



An einigen Stellen dieses Buches weisen die für alle Bände der Reihe „Das kannst auch Du“ einheitlich geschaffenen Symbole auf Situationen hin, die besondere Vorsicht erfordern. Diese Symbole bedeuten:



Vorsicht, Verätzungsgefahr!



Vorsicht, Explosionsgefahr!



Giftige Gase und Dämpfe entstehen –
für Frischluftzufuhr sorgen!



Die hier verwendeten Stoffe sind giftig!



Vorsicht, starke Ladungen bzw. hohe Spannungen!

Der Anhang

Lösungen der Fragen im Text

Seite 32: *Die Kerzenflamme*

wird zunächst platter; durch den scheinbaren Gewichtsverlust wirken sich die verschiedenen Wichten zwischen kalter und heißer Luft nicht mehr aus, und die Flamme wird nicht mehr „hochgesaugt“. Dadurch erhält sie den nötigen Sauerstoff nicht mehr und erlischt.

Seite 33: *Der Wasserstrahl*

versiegt, weil das Wasser während des freien Falles scheinbar sein Gewicht verloren hat.

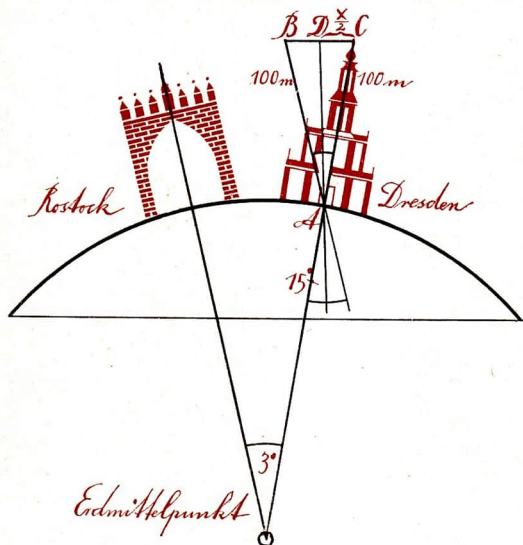
Der geradlinige Tunnel,

den wir durch die Erde gebohrt haben, kann nicht mit dem Paddelboot durchfahren werden; nach kurzer Strecke, die wir scheinbar bergauf fahren, stoßen wir oben an die Decke. Das Wasser hat überall den gleichen Abstand vom Erdmittelpunkt; bei einem 100 km langen Tunnel (in Form einer Sehne) ist die Mitte des Tunnels dem Erdmittelpunkt 200 m näher als die Ausgänge. Wenn wir durch einen solchen trockenen Tunnel gingen, dann hätten wir das Gefühl, die erste Hälfte des Weges bergab und die zweite Hälfte bergauf zu gehen. Scheinbar waagerechte Tunnel sind stets ein Teil eines Kreises um den Erdmittelpunkt.

Ein *Eisenbahnwagen* würde bis zur Mitte des geradlinigen Tunnels „abwärts“ sausen (ohne einen anderen Antrieb als die Erdanziehung) und dann durch die Trägheit wieder „aufwärts“ fahren – infolge der Reibung nicht ganz bis an den anderen Ausgang. Das Tropfwasser würde sich in der Tunnelmitte sammeln. Damit es abläuft, baut man einen großen Tunnel meist so, daß sein Mittelpunkt vom Erdmittelpunkt weiter entfernt ist als die Ausgänge.

Seite 34: *Der Radfahrer*

auf dem geradlinigen Brett fährt ebenfalls bis zur Mitte scheinbar bergab und dann bergauf.



Die Täuschung

der Parallelen wird in der Abbildung mathematisch als gleichschenkliges Dreieck ABC wiedergegeben (Parallele des linken Turmes in den rechten gelegt). Aus dem Dreieck ADC (Höhe steht senkrecht auf BC und halbiert diese Strecke und den Winkel bei A) berechnen wir mit Hilfe der trigonometrischen Sinusfunktion den gesuchten Abstand x der Turmspitzen:

$$\sin 1,5^\circ = \frac{x}{2} : (100 \text{ m})$$

$$x = 200 \cdot \sin 1,5^\circ \text{ m} = 200 \cdot 0,0262 = 5,3 \text{ m}$$

Wenn die Erdanziehung

mit einem Schlage verdoppelt wäre, dann gingen die Pendeluhrn schneller, Armbanduhren (mit Unruhe) dagegen richtig. Wir wögen alle das Doppelte – unangenehmer Gedanke. Wasserkraftanlagen würden mehr leisten; das Wasser wäre doppelt so schwer und die Energie eines um 1 m gehobenen Kubikmeters entsprechend größer. Da das Gewicht der Luft ebenfalls zunähme, würde sich auch die Leistung der Windmotoren vergrößern. Die Federwaage gäbe das doppelte Gewicht von dem an, was eine

Hebelwaage mit den alten Gewichtstücken anzeigt. Die Antriebe von Wasserpumpen müßten erheblich, die von Luftpumpen nur wenig verstärkt werden.

Der Mond

ist von der Sonne 400mal so weit entfernt wie von der Erde; diese zöge den Mond daher $400^2 = 160000$ mal stärker an – wenn nicht die Masse der Sonne mehr als 320000mal größer als die der Erde wäre. Sieger ist also, mit mehr als doppelt so starker Anziehungskraft, die Sonne.

Seite 35: Tausend Stahlkugeln

von je 1 mm Durchmesser wiegen nicht 10 kp, nicht 1 kp – nein, nur ganze 4 p! Sie bilden ja zusammen nur einen Würfel von 1 cm Kantenlänge. Ein solcher Kubikzentimeter ganz aus Stahl wöge 7,5 p; die Zwischenräume ergeben die Differenz von 3,5 p.

Seite 36: Zwei Kugeln

aus dem gleichen Werkstoff, deren Durchmesser sich wie 1 : 2 verhalten, haben ein Volumenverhältnis 1 : 8; also verhalten sich auch die Gewichte wie 1 : 8.

Eine Masse von 1 kg wiegt am Pol 5 p mehr als am Äquator – stets mit der Federwaage gemessen. Ein Kaufmann könnte also am Pol einiges gewinnen, wenn er am Äquator einkauft, wenn die sonstigen Voraussetzungen nicht so schlecht wären.

Die kluge Hausfrau

wischt im Wohnzimmer besser morgens Staub, weil sich die leichten Staubteilchen, die tagsüber in der Luft umhergewirbelt werden, über Nacht absetzen. Bei unruhigen Schläfern müßte sie im Schlafzimmer dann abends Staub wischen.

Seite 43: Das mittelgroße Haus

drückt mit etwa 2,5 kp auf 1 cm² des Untergrundes, ein großer Absatz (50 cm² bei 75 kp schwerem Menschen) mit 1,5 kp/cm², ein dünner Damenschuh-Absatz (0,25 cm², bei 60 kp schwerer Trägerin) mit 240 kp/cm². Zweihundertvierzig Kilopond! Das hält kein Teppich und kein Parkett aus. Aber die Mode hat sich noch nie in besonderem Maße um Naturgesetze gekümmert.

Pappe und Blei

– das Gewicht der Pappe verteilt sich auf eine größere Fläche; daher kommt der Eindruck (wortwörtlich!), sie sei leichter. Hängen beide Teile an gleichen Fäden, ist der Druck (und damit der Eindruck) auch gleich groß.

Der Fakir

hat nicht viel auszuhalten, nämlich mit 75 kp Körpergewicht bei 250 Nägeln je Fußsohle nur 0,15 kp auf eine Nagelspitze. R. H. Schulz hat es mit Schülern ausprobiert; er legte sich auf ein Brett, das in Abständen von je 1 cm mit 4 cm langen Nägeln besetzt war; dem Experimentator ist nichts geschehen.

Seite 44: Die Nadelspitze

im Kork hat einen Druck von 5000 kp/cm² ausgeübt.

Reißnägel

haben breite Köpfe, damit der große Nadeldruck auf eine möglichst große Fläche des Fingers übertragen wird. Da *Ziernägel* überhaupt keinen Kopf haben, würden wir uns beim Eindrücken mit der Hand verletzen; der Druck wäre zu groß.

Der Reckturner

würde aus dem gleichen Grunde die Haut an seinen Händen zerreißen — vor allem, wenn bei seinen Übungen die Fliehkraft hinzukommt.

Seite 47: *Das Kind*

kann man durch Aufblasen von vier Luftballons hochheben (Ballons durch Klötze seitlich gegen Abrutschen sichern, Brett drauflegen, gleichzeitig alle vier aufblasen).

Der Langholzwagen

durfte über die Brücke fahren, weil sich seine Last infolge des größeren Achsenabstandes auf eine größere Fläche der Brücke als beim Lastkraftwagen verteilte.

Die Traktoren

haben so große und breite Räder, weil die größere Fläche ein tieferes Einsinken in den weichen Ackerboden verhindert; außerdem wird die erwünschte Reibung vergrößert.

Seite 48: *Je größer*

die Hände beim Tragen Bleistift sind, um so besser, denn dadurch (mit der Masse) wird auch die Trägheitskraft größer. Sie tritt in allen drei Händen und im Bleistift auf.

Seite 54: *Wenn der Aufzug*

mit Erdbeschleunigung nach oben saust, dann müssen wir diese zweimal erdulden; unser Gewicht wird verdoppelt.

Seite 56: *Ein Gefühl für Geschwindigkeit*

wäre doch wohl peinlich. Wir brauchen nur daran zu denken, wie schnell wir uns mit der Erde um ihre Achse drehen und dazu noch durch den Weltraum sausen.

Seite 57: *Beim normalen Halten*

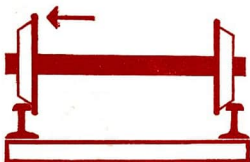
des Wagens an einer Haltestelle fallen wir nach hinten. Während des Bremsweges haben wir uns nämlich zurückgebeugt; hört die negative Beschleunigung (Verzögerung durch Bremsen) plötzlich auf, so bleibt unsere erste Gegenbewegung bestehen (wenn wir nicht aufpassen), und wir kippen, wie gesagt, nach hinten um.

Seite 66: *Die Fliehkraft*

wird mit wachsendem Radius größer; daher auch die Erdadplattung an den Polen.

Seite 71: *Eine Kugel*

hat unendlich viele freie Achsen, wenn sie homogen (in ihrer stofflichen Zusammensetzung einheitlich) ist.



Seite 88: *Das Quietschen*

entsteht durch Reibung zwischen Schiene und Rad. In einer Kurve hat das äußere Rad einen größeren Weg zurückzulegen als das an der Innenseite der Kurve (wie der äußere Flügelmann bei einer Schwenkung). Versuchen Sie einmal, lieber Leser, mit einer fest auf den Tisch gedrückten Garnrolle eine Kurve zu fahren! Es geht nicht. Sind – wie bei allen Schienenfahrzeugen – beide Räder fest mit der Achse verbunden, so wird entweder das Außenrad festgehalten oder das Innenrad zu schnell gedreht; eines rutscht immer und quietscht dann und regt die Schiene mit zum Konzert an. Die Eisenbahn hat durch schräge Laufflächen einen sehr guten Ausweg gefunden; in der Kurve läuft das Außenrad dadurch mit einem größeren Umfang als das Innenrad. Durch notwendige flache Profilierung der im Pflaster verlegten Schienen ist diese Lösung für Straßenbahnen leider nicht anwendbar.

Triebe man nur ein Rad über die Achse an und ließe das andere frei auf der Achse laufen, so wäre das Problem auch gelöst – aber man braucht beide Räder, um die Antriebskraft mit genügender Reibung zwischen Rad und Schiene zu übertragen. Karl Benz hat deshalb für seinen Kraftwagen das Differentialgetriebe erfunden. Die Abbildung zeigt die Wirkungsweise.

Die beiden Zahnstangen deuten die Antriebsräder an, die im Differentialgetriebe mit zwei Kegelhältern fest verbunden sind. Das Zahnrad in der Mitte überträgt die Antriebskraft vom Motor. Wird eine Zahnstange gebremst, so bewegt sich die andere um so schneller; das ist eine großartige technische Lösung auf der Grundlage der physikalischen Kraftübertragung nach dem Hebelgesetz mit Drehmomenten.

Die physikalische Voraussetzung

dafür, daß man ein Saiteninstrument spielen kann, ist der Unterschied in den Reibungszahlen der Saite und des Bogens. Zunächst faßt der Bogen die ruhende Saite und zieht sie – durch das etwas klebrige Harz Kolophonium unterstützt – ein Stückchen mit (Haftreibung), bis die in der Saite geweckte elastische Gegenkraft (Spannung) die Reibungskraft überwindet. In diesem Augenblick löst sich die Saite vom Bogen und schwingt unter dem nunmehr gleitenden Bogen (bei der kleineren Bewegungsreibung) frei aus, bis sie wieder vom Bogen mitgenommen wird und das Saitenspiel von neuem beginnt. (Man kann es voll genießen, auch wenn man die physikalischen Gesetze dazu kennt!)

Beim Tischtuch

oder der Kette auf dem Tisch ist die Reibungszahl gleich dem Quotienten a/b , wobei a die Länge des herabhängenden und b die des auf dem Tisch liegenden Teiles ist.

Gleitet

ein Körper eine geneigte Ebene hinab, so wird er (scheinbar) leichter. Dadurch wird gleichzeitig die Reibung kleiner, so daß sich der Körper bald ziemlich schnell abwärts bewegt.

Seite 89: Der Poller

hält das Schiff – besser: die Reibung zwischen Poller und Leine. Der Mann am Poller braucht nur am Ende der um den (möglichst rauhen) Poller gelegten Leine zu ziehen, um die Reibung möglichst groß zu halten. Sein Kraftaufwand ist dabei gering. 10 bis 20 kp etwa, manchmal noch weniger.

Seite 113: Die Kampfturbine

wird in erster Linie nicht vom Rückstoß bewegt, sondern durch die veränderte Oberflächenspannung; die Oberfläche zieht die Turbinenflügel.

Seite 116: Es ist gut,

daß sich die Lufthülle mit der Erde dreht; andernfalls müßten wir dauernd einen Sturm aushalten, der mit 1665 km je Stunde um unsere Ohren brauste. Was das bedeutet, wird klar, wenn wir damit die Luftgeschwindigkeit bei einem alles verwüstenden Orkan, Windstärke 12, vergleichen: über 104 km je Stunde. Fünfzehnfache Orkanstärke! Da wäre kein Leben mehr möglich.

Seite 121: Ein Kochkolben

mit flachem Boden (Stehkolben) ist für Unterdruckversuche ungeeignet, weil der ebene Boden dem Überdruck der Luft nicht widerstehen kann, sondern nach innen zerdrückt wird, „implodiert“. Nur gewölbte Flächen entsprechender Dicke können erheblichen Außendruck standhalten.

Seite 122: Dieser „Trichter-Springbrunnen“

gehört eigentlich nicht hierher, sondern zum Abschnitt Trägheit. Der Trichter drückt eine zylindrische Wassermenge in sich hinein, die infolge ihrer Trägheit und der des darunterliegenden Wassers nicht nach unten ausweicht. Es ist für sie leichter, den Weg nach oben durch das enge Rohr des Trichters zu nehmen. Je schneller wir den Trichter in das Wasser drücken, um so besser. Machen wir es langsam, so wird die Trägheitskraft nicht geweckt, und das Wasser gleicht sich unterhalb des Trichterrandes aus.

Seite 123: Die Kerzenflamme

verbraucht im umgestülpten Glas Sauerstoff und erzeugt dadurch Unterdruck. Der Luftdruck drückt von außen nach – und dabei das Wasser aus dem Teller in das Glas; die Münze liegt im Trockenen. Wir haben den Ein- und den Ausdruck, das Glas saugte die Luft ein. Wenn wir ein Glas heiß ausgespült und dann (noch naß) mit der Öffnung nach unten auf eine glatte Fläche gestellt haben, beobachten wir das gleiche; mit einigem Geräusch drängt die Luft durch das ablaufende Wasser in das Glas, in dem durch Abkühlung

der Luft ein kleiner Unterdruck entstanden ist. Auch Gase ziehen sich beim Abkühlen zusammen.

Seite 181: *Berühren wir*

die linke Metallkugel während der Influenz (Ladung), leiten wir die dortige positive Ladung ab; übrig bleibt die negative (rechts). Wir nehmen erst den Finger und dann den Hartgummistab fort; nun verteilt sich die negative Ladung auf das ganze Metall; beide Kugelpaare sind (schwächer als vorher) gespreizt.

Beim folgsamen Stock

ist das Gewicht durch die Unterlage (Stuhllehne) aufgehoben; die Unterlage bringt die Gegenkraft auf. Deshalb bewegt sich der Stock sehr leicht – wenn nicht gerade die Reibung stört.

Seite 188: *Das elektrostatische Windrad*

aus der Rasierklinge bewegt sich, weil die Ladung nicht aus den isolierten Teilen, sondern nur aus den gegenüberliegenden freien Teilen der Klinge ausströmen kann. Dadurch kommt der Rückstoß zustande.

Seite 246: *Die Teilspannungen*

betragen: $U_{AB} = 0,5 \text{ A} \cdot 10 \text{ Ohm} = 5 \text{ V}$; $U_{CD} = 0,5 \text{ A} \cdot 100 \text{ Ohm} = 50 \text{ V}$;
 $U_{EF} = 0,5 \text{ A} \cdot 330 \text{ Ohm} = 165 \text{ V}$; $5 \text{ V} + 50 \text{ V} + 165 \text{ V} = 220 \text{ V}$.

Seite 285: *Ein Spiegelbild*

läßt sich immer durch „Zusammenklappen“ um eine Symmetrieachse mit dem Gegenstand zur Deckung bringen. Wir schneiden aus einem einmal gefalteten Blatt Papier ein F heraus; wir erhalten zwei übereinanderliegende F. Die können wir immer nur um *eine* Kante zur selben Zeit umklappen, entweder um eine der beiden waagerechten (Oben und Unten vertauscht) oder um eine der senkrechten (Links und Rechts vertauscht – wie beim Spiegel). Beides zugleich ist nicht möglich.

Handsetzer und Metteure

gewöhnen sich zwangsläufig daran, denn alle Drucktypen (Lettern) sind in Spiegelschrift gegossen, damit sie im Druck wieder richtig erscheinen.

Seite 297: *Alle Katzen*

sind bei Nacht grau, denn die „Zapfen“ in der Augen-Netzhaut, die die Farben aufnehmen, sind weniger empfindlich und stellen ihre Tätigkeit früher ein als die Hell-Dunkel-, „Stäbchen“, die auch bei sehr geringem Licht (etwa Sternenlicht) noch Grauschattierungen vermitteln.

Seite 301: *DIE HOHE EICHE*

steht auch kopf; man merkt es nur nicht gleich, weil diese Buchstaben alle zur waagerechten Mittelachse symmetrisch sind.

Seite 304: *Das halbverdeckte Objektiv*

läßt das ganze Bild hindurch; nur die Helligkeit läßt entsprechend nach. Jeder Teil der Linse liefert das ganze Bild; deshalb stören kleine Schäden am Glas nicht (wenn sie nicht unerwünscht reflektieren und daher abgedeckt werden müssen).

Wir lesen weiter

Es gibt Tausende guter physikalischer Experimente; seit über 200 Jahren sind sie gesammelt und ständig erweitert und ergänzt worden. Hier sind vor allem solche Versuche vereint, die das Grundlegende, das Wesentliche des Geschehens zeigen und uns in die Lage versetzen sollen, von jeweils einer Erkenntnis aus viele dazugehörnde Erscheinungen zu verstehen. Ein einziges Buch kann dabei nicht alles erfassen. Deshalb sind hier einige besonders wichtige Begriffe und Naturgesetze beispielhaft herausgegriffen worden; nicht weniger Reizvolles mußte zurückbleiben, um das Ausgewählte ausreichend erklären zu können.

Viele Leser werden nun den Wunsch haben, weiterzuarbeiten und andere Gebiete der Physik experimentierend zu durchstreifen. Ihnen sei mit der folgenden Liste eine Literatúrauswahl gegeben. Ein Teil der nachfolgend empfohlenen Literatur gab auch dem Autor Anregungen und Informationen.

Die angeführten Bücher und Zeitschriften sind zu einem Teil im Handel, anderes besorgt uns eine Bücherei oder eine wissenschaftliche Bibliothek, zu deren Benutzern jeder junge Physiker zählen sollte. Wer das vorliegende Buch richtig benutzt hat, dem werden auch die anderen Werke und die in den Zeitschriften verstreuten Experimente keine Schwierigkeiten bereiten – im Gegenteil, er wird in der „Literaturvorbereitung“ neue Reize entdecken und sich dem Arbeitsstil der Wissenschaftler ein weiteres gutes Stück nähern.

In der Handbibliothek jedes Experimentators müssen sich darüber hinaus einige Standardwerke befinden, die sowohl bei der Vorbereitung als auch bei der Auswertung der Versuche herangezogen werden, um die Gesetzmäßigkeiten, die sich im Experiment offenbaren, die Beziehungen zur Technik usw. möglichst umfassend kennenzulernen; vor allem

alle Schulbücher „Physik“

und eine Logarithmentafel, mit Tabellen physikalischer Konstanten.

Einzelwerke

- Backe, H.: 25 Versuche zu den Grundgesetzen des elektrischen Stromes. 2. Aufl. Volk und Wissen, Berlin 1953
- Backe, H.: 25 Versuche Elektrisches Schalten und Messen. Volk und Wissen, Berlin 1955
- Backe, H.: Halt dich senkrecht! 2. Aufl. Kinderbuchverlag, Berlin 1970
- Backe H.: Rund um die Physik. 2. Aufl. Kinderbuchverlag, Berlin 1975
- Backe, H., u. König, L.: Elektrotechnik selbst erlebt. 4. Aufl. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1974
- Conrad, W.: Streifzüge durch die Physik. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1961
- Conrad, W.: Streifzüge durch die Elektrotechnik. 2. Aufl. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1968
- Conrad, W.: Streifzüge durch die Halbleitertechnik. 2. Aufl. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1969
- Förster, H.: Einheiten, Größen, Gleichungen und ihre praktische Anwendung. 2. Aufl. Fachbuchverlag, Leipzig 1972
- Göldner, K., u. Müller, J.: Streifzüge durch die Steuerungs- und Regelungstechnik. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1967
- König, L.: Rundfunk und Fernsehen selbst erlebt. 2. Aufl. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1972
- Küstner, H.: 25 Versuche aus der Physik. 3. Aufl. Volk und Wissen, Berlin 1953
- Lindner, H.: Das Bild der modernen Physik. 2. Aufl. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1975
- Lindner, H.: Ströme, Felder, Elektronen. 3. Aufl. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1972
- Meyer, K., und Quaas, M.: Die Energie als Fähigkeit, nützliche Arbeit zu leisten. In: Energie aktuell. Hrg. von M. Quaas und H.-J. Hildebrand. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1975
- Niese, G.: 25 Freihandversuche. 3. Aufl. Volk und Wissen, Berlin 1953
- Niese, G.: Wie kommt denn das? 3. Aufl. Kinderbuchverlag, Berlin 1960
- Niese, G.: 100 Eier des Kolumbus. 4. Aufl. Kinderbuchverlag, Berlin 1964
- Niese, G.: Spiele und Experimente. 5. Aufl. Kinderbuchverlag, Berlin 1969
- Perelman, J. I.: Unterhaltsame Physik. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1963
- Selber, M.: Mit Spulen, Draht und Morsetaste. 3. Aufl. Kinderbuchverlag, Berlin 1960
- Vocke, W.: 25 Versuche aus der Mechanik. Volk und Wissen, Berlin 1956

Zeitschriften

Jugend und Technik
Physik in der Schule
technikus
Urania
Wissenschaft und Fortschritt

Ein Wort zum Schluß

Unser Streifzug durch die Physik ist beendet; das soll aber nicht heißen, daß unsere Beschäftigung mit dieser Wissenschaft aufhören soll. Für den Leser, der mit wachem Sinn durchs Leben geht, ist das ohnehin unmöglich. Er erkennt, wie die physikalischen Gesetze in allen Bereichen wirken, er weiß, daß jede Industrie auch „physikalisch“ ist.

Allen technischen Maschinen, Geräten und Verfahren gemeinsam ist das physikalische Naturgesetz als Arbeitsgrundlage. Die Physik, so kann man sagen, ist – gemeinsam mit der Mathematik – eine „Schlüsselwissenschaft“. Der Zusammenhang zwischen Physik und Technik ist wechselseitig. Jede gibt und nimmt. Die Entwicklung eines Industriezweiges geht im Rahmen der gesellschaftlichen Notwendigkeit immer nur so weit, wie der „physikalische Impuls“ reicht. Die Technik schafft ihrerseits – auf Grund früherer Impulse – ausreichende Einrichtungen für die Arbeiten im Laboratorium. Ganz besonders eng arbeiten zum Beispiel Physik und Technik auf dem Gebiet der Kernphysik zusammen. Wie viele technische Voraussetzungen waren für die physikalische Atomforschung nötig, und welch riesengroße Impulse erhielt die Technik! Überall zeigt sich die enge Verbundenheit zwischen Physik und Technik und damit zwischen Theorie und Praxis; die theoretischen Probleme der Technik sind stets naturwissenschaftlich-mathematischer Art. Weil das so ist, wollen wir uns beim Experimentieren auch immer ein wenig nach den Anwendungen unserer Erkenntnisse in der Technik umsehen. Das Bau- und Experimentierbuch „Elektrotechnik selbst erlebt“, das als Fortsetzung und Ergänzung des vorliegenden Bandes geschrieben wurde, gibt dazu vielfache und eingehende Anleitungen und Erläuterungen.

Physik und Technik entwickeln sich in unseren Tagen immer stürmischer. Ein Grund dafür liegt in der Tatsache, daß sich die Spezialisten zu einer Gemeinschaftsarbeit zusammenfinden; das Ergebnis ist dann mehr als nur die einfache Summe aller Einzelarbeiten! Der Weltraumflug, diese kühnste Anwendung der Physik, ist dafür überzeugender Beweis.

Auch wir sollten uns die Gemeinschaftsarbeit von Anfang an zum Prinzip machen. Schon beim einfachsten Experiment sehen vier, sechs oder acht

Augen mehr als zwei; ganz abgesehen davon, daß eine ganze Reihe von Experimenten dieses Buches (denken wir nur an die Bestätigung der Fallgesetze) ohne eine exakt eingespielte Beobachtergruppe kaum durchführbar ist. Sicher finden sich allerorts einige, die mit uns gemeinsam die Gesetze der Physik entschleiern wollen, und haben wir diese Gleichgesinnten gefunden – was hindert uns, an der Schule, in der Pionier- oder FDJ-Gruppe eine Arbeitsgemeinschaft Junger Physiker zu gründen? In dieser Gruppe werden sich auch bald Spezialisten herausbilden, die Gerätebauer, die Mathematiker oder die unermüdlichen „Bücherwürmer“, die immer neue Experimente aufstöbern.

Und wenn in einer solchen Gemeinschaft einmal spezielle Probleme auftauchen, die auch mit Hilfe des Lehrers nicht zu lösen sind, dann wird wohl jeder Wissenschaftler seinen „jungen Kollegen“ gern weiterhelfen. Unsere volkseigene Industrie verfügt heute über einen guten Stamm ausgebildeter Physiker, und wo sie noch fehlen sollten, hilft eine Anfrage beim nächsten physikalischen oder physikalisch-technischen Institut. Vielleicht läßt sich auf diese Weise auch einmal eine Betriebs- oder Laborbesichtigung vereinbaren, die neue Anregungen gibt.

Diese intensive Beschäftigung mit der Physik wird die Leser dieses Buches mehr und mehr zu „klugen Menschen“ werden lassen, zu Menschen, die das Wirken der Naturgesetze in ihrer Umwelt erkennen und sinnvoll nutzen. Und vielleicht wird die Freude am physikalischen Arbeiten bei einigen Lesern so groß, daß aus der gelegentlichen Beschäftigung ein Beruf – eine Berufung! – wird. Diesen Lesern eröffnet sich ein unendlich weites Feld. Industrie, Forschungsinstitute und nicht zuletzt die Schule brauchen in den kommenden Jahrzehnten immer mehr Physiker, um alle Aufgaben bewältigen zu können, die uns das Leben in täglich wachsender Fülle stellt.

Mir bleibt zum Schluß die angenehme Pflicht, allen zu danken, die beim Entstehen dieses Werkes mitgeholfen haben, an erster Stelle meiner Frau Ursula. Den Herren Diplomgewerbelehrer Heinz Rüdger, Dr. Fritz Anacker und Dr. Lothar König gebührt ein besonderer Dank für ihre tatkräftige Mitarbeit bei Experimenten und Bebilderung, den Herren Fachlehrer Siegfried Reichelt, Fachlehrer Hans-Joachim Wilke, Dr. Horst Schubert und Dr. Manfred Kießling für die wertvollen Anregungen zu den Nachaufgaben. Nicht zuletzt sei Herr Prof. Dr. Karl Werner genannt, der als einer der ersten und zugleich kritischsten Leser viel zur Abrundung des Manuskripts beigetragen hat.

Dresden, im Herbst 1974

Prof. Dr. Dipl.-Ing. Hans Backe

Sachwörterverzeichnis

- Abendröte 312
 Absoluter Nullpunkt 146
 Absorption 153
 Abszisse 17
 Achse, freie 69
 Actio gleich reactio 61, 90
 Adhäsionskraft 78, 104
 Aggregatzustand 147f.
 Akkumulator, Bau 215
 Ampèresche Schwimmerregel 223
 Aneroidbarometer 117
 Anion 211
 Anlaßfarben 308
 Anode 211
 Anstellwinkel 133
 Äquatorialuhr 282
 Arbeit 55
 Atmosphäre, physikalische 115
 —, technische 115
 Auftrieb 130, 132f.
 Aufzug 32, 53

 Balkenwaage 19f.
 Bandgenerator 168f.
 bar 115
 Barometer 118, 145
 Becherapparat 203
 Benetzen 111
 Beschleunigung 18f.
 Berührungsspannung 158, 168
 Beugung 309f.
 Beugungsgitter 312
 Bewegungsenergie 58
 —, mittlere der Moleküle 151
 Bleisammler 215
 Blitz 192
 Brechung 288f.
 Brechungsgesetz 291
 Brennpunkt 288
 Brennweite 276, 298
 Brownsche Bewegung 140f.
 Bügel-Kraftmesser 38

 Curietemperatur 267

 Dampfheizung 148
 Dampfmaschine 138
 Dauermagnet 222
 Deduktion 10

 Deduktives Verfahren 11
 Dekadenwiderstand 253
 Diagramm 17
 Dielektrikum 172
 Differentialgetriebe 324
 Diffusion 143
 Dispersion 295
 Dissoziation 206, 211
 Doppelnatur des Lichtes 274
 Dosenbarometer 117
 Drehimpuls 51
 Drehschlüssel-Meßgerät 235f.
 Dreifingerregel 234
 Druck 43, 114f., 128f.
 Druckanzeiger 131
 Druckkraft, dynamische 130
 Dünne Schichten 305f.
 Durchschnittsgeschwindigkeit 16
 Dynamik 12, 92
 Dynamischer Auftrieb 133f.
 Dynamisches Gleichgewicht 130
 Dynamomaschine 263

 Einheiten, dezimale Teile und Vielfache von 42
 Einkomponentenwaage 134
 Elektrische Ladung 159, 178f.
 Elektrische Widerstandsmessung 253f.
 Elektrische Windturbine 189
 Elektrischer Löffel 186
 Elektrischer Rückstoß 188
 Elektrischer Strom, chemische Wirkung 208f.
 —, Magnetwirkung 222f.
 Elektrischer Widerstand 217f., 252f.
 Elektrisches Feld 158, 269
 Elektrizität 158f.
 —, strömende 196f.
 Elektrodynamisches Prinzip 262
 Elektrolyse 209, 211f.
 Elektrolyt 205, 211
 Elektrolytische Dissoziation 211
 Elektromagnetische Induktion 263
 Elektromagnetisches Feld 273
 Elektromagnetismus 222f.
 Elektrometer 174
 Elektromotor 227, 269
 Elektromotorisches Prinzip 226f., 233
 Elektrophor 162f.

 Elektron 160, 196f.
 Elektronenstromrichtung 224
 Elektroskop 161, 174f.
 Elektrostatisches Potential 182
 Elementarmagnete 207
 Emission 153
 Energie 54f., 138f.
 Energie-Erhaltungssatz 55, 139
 Entlader 173
 Erdanziehung 20, 34, 53
 Erdbebenmesser 58
 Erdbeschleunigung 25, 54
 Erdfernrührer 303
 Ergänzungsfarben 296
 Expansion 143

 Fallbeschleunigung 25
 Fallgesetz 10f.
 Fallkegel 21f.
 Fallrinne 28
 Fallschnur 27
 Faradayscher Käfig 182
 Farben 294f.
 Farben an dünnen Schichten 305f.
 Farbenkreisel 296
 Farbenspiele 296
 Faseroptik 294
 Fata morgana 293
 Federwaage 20, 37f.
 Feld, elektrisches 158, 269
 —, magnetisches 225, 269
 Feldlinien 158, 176, 190, 225
 Fernrohr 302f.
 Feststellen der Stromrichtung 231
 Fettfleck-Fotometer 279
 Fliehkraft 37, 59f.
 Fliehkraftregler 66
 Formen der Energie 138
 Fotokamera 302
 Freie Achse 69
 Freier Fall 15, 25f.
 Froschschienkelversuch 199
 Funken 191
 Funkentladung 159

 Galileisches Fernrohr 304
 Galvanisches Element 201
 Galvanisieren 213f.
 Galvanometer 223, 232

Galvanoskop 232f.
 Gegenkraft 52, 61, 90f.
 Geneigte Ebene 28f.
 Generator 263
 Geschwindigkeit 12, 16f., 25f.
 -, kritische 125
 Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz der
 gleichmäßig beschleunigten Bewe-
 gung 27
 Gewicht 19f., 54
 Glaslinse 299
 Gleichgewicht, dynamisches 130
 Gleitlager 78, 81
 Gleitreibung 78
 Gleitreibungskraft 80
 Gleitreibungszahl 82
 Gravitationsgesetz 34
 Grenzfläche 103
 Grundelemente 41

Haftkraft 104
 Haftreibung 78
 Haftreibungszahl 86
 Heber 132
 Heronsball 122
 Herons Dampfmaschine 97
 Himmelblau 312
 Hitzdraht-Meßgerät 144f., 218f.
 -, Eichen als Strommesser 220
 Hohlspiegel 276f., 287f.
 Höhenmesser 116
 Hookesches Gesetz 40
 Huygensches Prinzip 310
 Hydraulische Presse 44
 Hydroxyl-Ion 211
 Hypothese 11

Implodieren 120
 Impulsatz 98
 Induktion 261f.
 Induktives Verfahren 11
 Influenz 160, 185
 Injektor 132
 Interferenz 307f.
 Interferenzfarben 311f.
 Inversion 294
 Ion 186, 197, 211
 Ionisation 186
 Isolator 158, 161
 Isolierschemel 187

Kältemischung 156
 Kalorimeter 154f.
 Kapazität 172
 Kation 211
 Katode 211
 Keplersches Fernrohr 302f.
 Kinetische Energie 56
 Kinetische Wärmetheorie 143
 Kohärenz 306
 Kohäsion 104, 143
 Kommutator 269
 Kompaßnadel 222
 Komplementärfarben 296
 Konkavlinse 298
 Kontaktspannung 208
 Kondensator 162, 173
 Konvexlinse 298
 Koordinatensystem 17
 Korkenzieher-Regel 230f.
 Kräfte, Parallelogramm der 62
 Kraft 36f., 41
 Kraftstoß 98

Kreisel 69f.
 Kreiselkompaß 74
 Kreiselpumpe 66
 Kristall 197
 Kritische Geschwindigkeit 125
 Kugelfallmethode 24
 Kurbelwiderstand 253

Ladung, elektrische 159
 Läufer 269
 Laminare Strömung 124
 Leidener Flasche 172f.
 Leiter erster Klasse 196, 203
 -, zweiter Klasse 203
 Leitfähigkeit 198
 Lenzsche Regel 269
 Leuchtdichte 277
 Licht 272f.
 Lichtquanten 274
 Lichtquellen 275f.
 Lichtstärke 277
 Lichtwellen 273, 305f.
 Linsen 297f.
 Linsengleichung 299
 Lochkamera 283
 Lösungsdruck 213
 Luftdruck 114f., 117f.
 Luftkraft 130
 Luftlinse 301
 Luftpumpe 114
 Luftreibung, Einfluß auf Fallge-
 schwindigkeit 13
 Luftwiderstand 135
 Lupe 300, 302

Magdeburger Halbkugel 92, 114,
 147
 Magnetisches Feld 225f., 230, 269
 Magnetische Feldlinien 225, 227f.,
 230
 Manometer 131
 Masse 19f.
 Massenanziehung 13
 Medium 15
 Mindestflächen 106f.
 Mischungstemperatur 154
 Molekül 103, 139
 Moleküle, mittlere Bewegungsenergie
 der 151
 Molekularbewegung 140, 198, 267
 Molekularkräfte 37
 Morgenröte 313
 Multiplikator 232

Nachbilder 318
 Naturgesetze, Bereiche der 309
 Neigungswaage 19
 Netzmittel 110
 Newton (Krafteinheit) 41, 115
 Newtonsche Ringe 308
 Newtonsches Prinzip, erstes 47
 NiFe-Akkumulator 216
 Normalkraft 60
 Nullpunkt, absoluter 146
 Oberflächenaktive Stoffe 109
 Oberflächenspannung 24, 102f., 108
 Ohm (Widerstandseinheit) 242
 Ohmsches Gesetz 203, 242, 264
 Optische Bank 297
 Optische Linsen 297f.
 Optische Täuschungen 315f.
 Ordinate 17

Parallelogramm der Kräfte 62
 Parallelschaltung 228
 Parallelwiderstand 237
 Pendel 56f.
 Periode 273
 Physikalisch-technisches Maßsystem
 41

Pol 159
 Polarisationsspannung 204
 Polarität 159
 Pond 20
 Potential, elektrostatisches 182
 Potentielle Energie 55
 Potentiometer 246f.
 Präzession 70
 Primärelement 203
 Primärstrom 263
 Prisma 294f.
 Prismen-Fernrohr 303
 Profil 133

Quecksilber-Barometer 117

Radialkraft 59
 Raketenantrieb 93, 96
 Rammte 55
 Rasensprenger 94
 Raumgitter 196f.
 Raumschiff 97
 Reflexion 284f., 291f.
 Reibung 36, 74f.
 Reibungs-Elektromaschine 164f.
 Reibungselektrizität 159f.
 Reibungswärme 77, 83
 Reibungswiderstand 76, 79f.
 Reibungszahl 86
 Reibungszahl 82
 Reibzeug 158
 Reihenschaltung 228f.
 Relativität 63
 Repulsion 93
 Resultierende 61
 Ringleitung 248f.
 Rollreibung 78
 Rollreibungszahl 83
 Rotor 269
 Rückstoß, elektrischer 188
 Rückstoßkraft 93
 Ruhedruck 132

Sammellinse 298
 Sammler 215
 Satz von der Erhaltung der Energie
 139

Saugpumpe 117
 Schatten 279f.
 Schatten-Fotometer 278
 Schiffskreisel 71
 Schleuder 66
 Schleudergrube 67
 Schleuderguß 67
 Schmelzwärme 147
 Schmierwirkung 103
 Schub 93
 Schüttwinkel 86
 Schwerebeschleunigung 25
 Schwungmaschine 64f.
 Schwungrad 58
 Segnersches Wasserrad 94, 188
 Seehorizont 286
 Seifenhaut 106f.
 Seismograph 58
 Sekundärelement 216

Sekundärspannung 263
 Selbstinduktion 239
 Selbstinduktionsspannung 263
 Senkrecht-Galvanoskop, Bau des 232f.
 Shunt 237
 Siedepunkt 149f.
 Sog 130, 132
 Sonnenuhr 280f.
 Spalt 311
 Spannung 241ff.
 Spannungsabfall 244f.
 —, elektrostatischer 245
 Spannungsfeld 182
 Spannungsreihe 162, 203, 209
 Spannungsteilung 244f., 246f.
 Spektralfarben 295
 Spezifische Wärme 155
 Spiegel 284f.
 Spiegel, gekrümmte 287f.
 Spiegelbilder 285
 Spiegelschrift 285
 Spitzentladung 188
 Spitzenlast 252
 Spreitungskreis 111
 Sputnik 97
 Ständer 269
 Statik 92
 Statischer Druck 129
 Stator 269
 Strahltriebwerke 97
 Streuung 312
 Strömende Elektrizität 196ff.
 Strömung 124
 —, laminare 124
 —, turbulente 125
 Strömungskanal 133

Strömungswiderstand 125
 Strom 241f.
 Stromkreis 197
 Stromlinienprofil 133
 Stromrichtung, Feststellen der 231
 —, technische 224
 Stromwärme 198, 217f.

Technische Stromrichtung 224
 Teilspannung 245
 Totale Reflexion 291
 Trägheit 36f., 46f., 53, 56f.
 Trägheitsgesetz 47
 Transformator 261
 Turbulente Strömung 125

Überlagerung von Wellen 308
 Umlaufrichtung der Feldlinien 230
 Umspanner 261
 Unipolar-Motor 258

Verbundbetrieb 250
 Verdampfungswärme 147
 Vergaser 132
 Vergleichsverfahren 253
 Verzögerung 48
 Volta-Element 204f.
 Voltasche Säule 201, 204

Wälzlager 78
 Wärme 138ff.
 — spezifische 155
 Wärmelehre, erster Hauptsatz der 139
 —, zweiter Hauptsatz der 154
 Wärmeleitung 151
 Wärmestrahlung 153f., 272
 Wärmeströmung 152f.

Wärmetheorie, kinetische 143
 Wärmeübertragung 151
 Warmwasserheizung 152
 Wagenfederung 56
 Walzenlager 145
 Waschen 108
 Wasser, Physik des -s 145f.
 Wasserlinse 301
 Wasserstrahl-Luftpumpe 15, 132
 Wasserwert 155
 Wechselstrom 263
 Weg-Zeit-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung 17
 — einer beschleunigten Bewegung 30
 Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung 16
 — der gleichmäßig beschleunigten Bewegung 26
 Weicheisen-Meßgerät, Bau des -s 237f.
 Weihnachtspyramide 153
 Wheatstonesche Meßbrücke 254f.
 Widerstand 198, 217f., 241f., 252f.
 Widerstandsmessung, elektrische 253f.
 Windturbine, elektrische 189
 Winkelspiegel 286
 Wirbel 124f.
 Wucht 56

Zentrifugalkraft 59
 Zentrifuge 66
 Zentripetalkraft 51
 Zerstäuber 132
 Zerstreuungslinse 298
 Ziehkraft 59
 Zug 42

Der Inhalt

<i>Vom törichten und vom klugen Menschen</i>	5
--	---

1. Kräfte und Wirkungen

<i>Scherben bringen Glück</i>	10
Einiges zum Fallgesetz (10); Zwischendurch etwas zum Nachdenken, zunächst über die gleichförmige Bewegung (16); Einiges über die Beschleunigung (18); Der Fall im flüssigen Medium (23); Freier Fall – jetzt mit Zahlen und Versuchen (25); Noch etwas zum Nachdenken (31)	
<i>Was die Welt bewegt</i>	36
Von der Einheit der Kraft (37); Druck braucht eine Fläche (42)	
<i>Die anerkennenswerte Trägheit</i>	46
Experimente am laufenden Band (47); Von der Trägheit zur Energie (54); Trägheit überall (56)	
<i>Fliehkraft, Kettenkarussell und Todeskurve</i>	59
Wir lernen neue Kräfte kennen (59); Es kommt auf den Standpunkt an (62); Auch der Kreisel „lebt“ von der Trägheit (69)	
<i>Die böse und die gute Reibung</i>	74
Die Welt ohne Reibung (75); Was ist überhaupt Reibung? (77); Kann man mit der Reibung auch rechnen? (78); Und der Werkstoff? (81); Einige weitere Versuche zur Reibung (83); Nachdenkliches zur Reibung (88)	
<i>Gegenkraft und allerlei Stöße</i>	90
Die alte Bekannte (90); Es fing damit an, daß . . . (97)	
<i>Wasser hat eine Haut</i>	102
Von der Oberflächenspannung (103); Die zugkräftige Seifenhaut (106); Waschen – leicht gemacht durch Physik (108)	
<i>Die Luft hat auch Gewicht</i>	114
Wir messen den Luftdruck (117)	
<i>Einiges von der Strömung</i>	124
Schichten und Wirbel (124); Geschwindigkeit und Druck (128)	

2. Moleküle und Bewegungen

<i>Von der Wärme</i>	138
Energie wird verwandelt (138); Das Wesen der Wärme (139); Robert Brown entdeckt eine merkwürdige Bewegung (140); Wärme dehnt die Körper aus (143); Wasser ist ein merkwürdiger Stoff (145); Die Aggregatzustände (147)	
<i>Der Weg der Wärme</i>	151
Wärme breitet sich auch durch Strömung aus (152); Und schließlich: Die Wärmestrahlung (153); Körper mit verschiedenen Temperaturen (154)	

3. Ladungen und Felder

<i>Es fing damit an</i>	158
Wie wirkt die Reibung? (158); Gestörtes Gleichgewicht (159); Die einfachsten Methoden (161); Der vergessene Elektrophor (162); Die Reibungs-Elektroversiermaschine (164); Die Ladung aus der Flasche (167); Elektrizität aus Wassertropfen (167); Ganz neuzeitlich: Der Bandgenerator (168)	
<i>Die elektrische Ladung wird gesammelt und angezeigt</i>	172
Die Leidener Flasche (172); Das Elektroskop (174)	
<i>Allerlei vergnügliche Wirkungen der elektrischen Ladung</i>	178
Das Spiel der Ladungen (178); Entladung „mit Effekt“ (187)	

4. Ströme und Kräfte

<i>Die strömende Elektrizität</i>	196
Die Frösche des Dr. Galvani (198); Voltas Säulen liefern den ersten elektrischen Strom (201); Volta baut sein Element (203)	
<i>Der elektrische Strom zeigt, was er kann</i>	208
Ein neuer Schritt (208); Wir galvanisieren (213); Der Strom erwärmt seinen Leiter (217)	
<i>Der elektrische Strom hat stets ein magnetisches Feld um sich</i>	222
Die Magneten tanzen (223); Wir experimentieren weiter (227)	
<i>Spannung unter der Lupe</i>	241
Spannung, Strom und Widerstand (241); Spannungsteilung, Spannungsabfall (244); Spannung geht verloren (248); Der elektrische Widerstand wird gemessen (252)	
<i>Elektrizität aus Bewegung</i>	257
Faraday zeigt den Weg (257); Die Induktion (261); Einige Betrachtungen zu den Induktionsversuchen (267)	

5. Licht und Strahlen

<i>Der Weg des Lichtes</i>	272
Der Mensch beginnt, das Licht zu erforschen (272); Experimente mit dem Licht (274); Wo Licht ist, ist starker Schatten (277); Die	

Spiegelwelt (284); Der Lichtstrahl wird gebrochen (288); Das Prisma bringt die Farben an den Tag (294); Schein und Wirklichkeit der Linsen (297)	
<i>Das Licht als Welle</i>	305
Von Farben, die man nicht in der Tüte kaufen kann (305); Das Licht geht manchmal krumme Wege (309)	
<i>Der geistige Nachsch: Optische Täuschungen</i>	315

Der Anhang

<i>Lösungen der Fragen im Text</i> (320); <i>Wir lesen weiter</i> (327); <i>Ein Wort zum Schluß</i> (329); <i>Sachwörterverzeichnis</i> (331)	
---	--



Gleichstrom

Steckverbindung



Wechselstrom

Schließer allgemein
Schließer mit Handbetätigung



Gleich- oder Wechselstrom



Kreuzung zweier Leiter
ohne elektrische Verbindung

Stufenschalter



Kreuzung zweier Leiter
mit elektrischer Verbindung

Anzeigendes Meßgerät



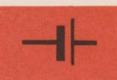
Abzweigung

Schreibendes Meßgerät



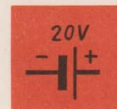
Abzweigung
(trennbare Verbindung)

Meßgerät allgemein
Meßgerät allgemein
mit beidseitigem Ausschlag



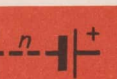
Galvanische Spannungsquelle
(allgemein)

Strommesser



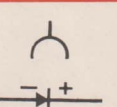
Galvanische Spannungsquelle
(mit Angabe der Spannung)

Milliamperemeter



Batterie mit n Zellen

Spannungsmesser



Buchse

Millivoltmeter

Gleichrichter

Statischer Spannungsmesser

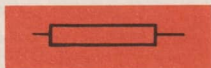


SCHALTZEICHEN

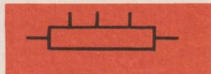


Glühlampe

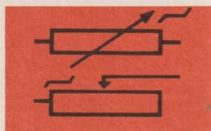
Glimmlampe



Widerstand allgemein



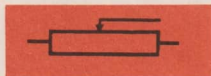
Widerstand mit Anzapfungen



Widerstand, stufig verstellbar



Widerstand, stetig verstellbar



Spannungsteiler, stetig verstellbar



Spule allgemein



Spule allgemein mit Eisenkern



Spule allgemein mit Anzapfungen



Dauermagnet



Wicklung, Spule allgemein

