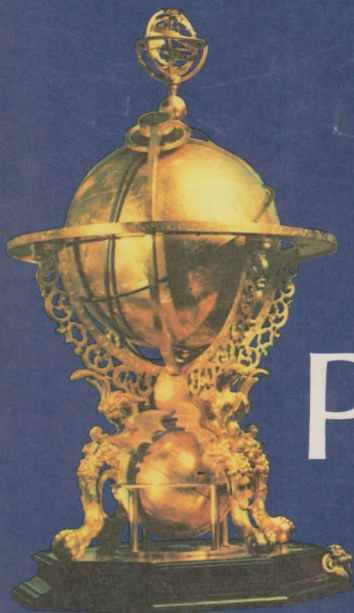
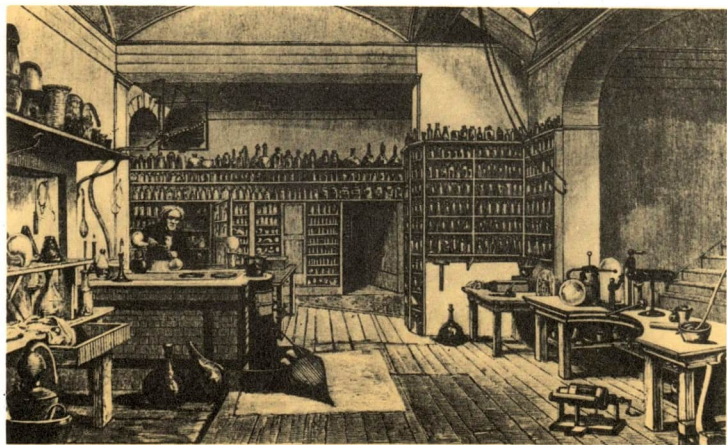


HANS BACKE



RUND  
UM  
DIE  
PHYSIK

## **RUND UM DIE PHYSIK**



**HANS BACKE**

# **Rund um die Physik**

**Aus der Geschichte der Physik  
und ihrer Forscher**

**DER KINDERBUCHVERLAG BERLIN**





Gestaltung: Marianne Gossow-Rodrian  
Technische Zeichnungen: Rosemarie Nast  
Einband Vorderseite: Guericke's Versuch mit den  
„Magdeburger Halbkugeln“  
Kupferstich aus dem Jahre 1664  
Himmels-Globusuhr aus dem Jahre 1586  
Einband Rückseite: Das 10 m hohe Wasserbarometer,  
das Guericke um 1660 an seinem Haus anbrachte  
Seite 2: Faraday in seinem Laboratorium

Alle Rechte vorbehalten  
Printed in the German Democratic Republic  
Lizenz-Nr. 304-270/83/73-(30)  
Fotosatz: Interdruck, Leipzig  
Repro, Druck u. Verarbeitung: Karl-Marx-Werk Pößneck  
1. Auflage  
ES 9 F  
Für Leser von 12 Jahren an  
Best.-Nr. 628 7537  
EVP 12,80

# Vorwort

Mit diesem Buch soll in einer Auswahl und dennoch im Zusammenhang vom Entstehen und Wachsen der Physik berichtet werden. Unsere Welt und unser Leben sind so grundlegend und überall mit physikalischen Kräften und Wirkungen verwoben, daß es beispielsweise gar keine „physikalische Industrie“ (wie etwa die chemische Industrie) gibt und geben kann; aber man kann dagegen sehr wohl sagen: Jede Industrie ist auch physikalisch, weil sie ohne die Anwendung der physikalischen Naturgesetze überhaupt nicht denkbar wäre.

Wir können aus unserem täglichen Leben einen beliebig großen oder kleinen Ausschnitt untersuchen: Neben anderen – etwa politischen, wirtschaftlichen und technischen – werden wir unweigerlich auch auf physikalische Gesetze stoßen. Viele Naturwissenschaften, beispielsweise die Chemie und die Biologie sowie die Medizin, werden, wie schon angedeutet, immer „physikalischer“. Hier geht die Entwicklung offensichtlich zu einer großartigen Einheit hin, von der schon griechische Philosophen vor unserer Zeitrechnung geträumt haben; sie tut das im ganz Großen ebenso wie im winzig Kleinen.

Eine Geschichte der Physik ist – auch wenn sie sich auf hervorragende Ausschnitte beschränken muß – untrennbar mit dem Leben und der Arbeit der Forscher, kluger Denker und Beobachter, die der Menschheit neue Erkenntnisse brachten, verbunden. Wir wollen nicht nur von ihren Erfolgen berichten, sondern auch von ihren Irrtümern, von den Schwierigkeiten, die ihnen eine verständnislose oder widerstrebende Umwelt machte.

Das aufzuschreiben war eine schwierige Aufgabe, und der Autor muß um Nachsicht bitten, daß der beschränkte Rahmen dieses Buches dazu zwingt, Menschen und Ereignisse wegzulassen, die nicht minder wichtig sind als diejenigen, die hier Platz gefunden haben. Aber es gibt ja noch mehr Bücher, in denen der Leser mit Fleiß und List manches Fehlende findet!

# Auch der größte Strom hat eine kleine Quelle

Jeder Wasserlauf entspringt einer Quelle. Dem Rinnsal gesellt sich weiter abwärts das Wasser einer zweiten Quelle hinzu; dann kommen weitere Zuflüsse, und aus dem Quellwasserlauf wird ein Bach und bald ein Fluß. Er wird schiffbar, nutzbar; Ortschaften entstehen an seinen Ufern. Andere Flüsse, auf gleiche Weise entstanden, lassen als Nebenflüsse unseren Fluß schließlich zum breiten Strom werden, der große Schiffe trägt. Hohe und weitgespannte Brücken überqueren ihn, Tunnel führen unter ihm hindurch, um den Verkehr von einem Ufer zum anderen möglich zu machen.

Ganz ähnlich entsteht auch eine Wissenschaft; aus einem bescheidenen Anfang wird sie durch viele Zuflüsse von allen Seiten zum großen Strom der Erkenntnis und des Fortschritts. Früher dauerte das sehr lange, oft Jahrhunderte; heute geht es so schnell, daß kein Mensch mehr alles Neue erfassen kann. In etwa zehn Jahren verdoppelt sich zur Zeit die Zahl der wissenschaftlichen Erkenntnisse. Das ist atemberaubend, abenteuerlich, ja – revolutionär!

Das war, wie gesagt, nicht immer so. Vor mehreren Millionen Jahren erhoben sich Lebewesen, eine besonders hoch entwickelte Affenart, auf die Hinterbeine, sie gingen aufrecht und lernten, mit den zum Laufen nicht mehr nötigen Vordergliedmaßen zu arbeiten; diese wurden zu Händen. Sie begannen, Werkzeuge herzustellen, mit denen sie sich besser Nahrung beschaffen konnten. So entstand in Jahrmillionen durch die Arbeit der Mensch.

Der Urmensch hatte nicht die Kräfte der großen Wildtiere, er konnte weder fliegen noch wie die Fische im Wasser leben; er hatte kein eigenes Haus mitbekommen wie die Schnecke. Viele Tiere konnten sich schneller als er bewegen. Er konnte sich nicht eingraben zum Überwintern und war Naturereignissen schutzlos ausgesetzt.

Eines aber hatte der Mensch im Laufe von Jahrmillionen immer stärker entwickelt: sein Gehirn. Mit dessen Hilfe hat er sich in harten Kämpfen gegen die Unbilden der Natur und die Angriffe körperlich

überlegener Tiere allmählich zu einem intelligenten Lebewesen emporgearbeitet. Der Mensch lernte, zu beobachten und – vor allem – Schlüsse aus dem Beobachteten zu ziehen und sich danach zu richten. Er sammelte Früchte und Wurzeln, jagte, baute Höhlen zu Wohnungen aus, legte Vorräte an, schuf sich aus Fellen Kleidung.

Ein großer Fortschritt war die Nutzbarmachung des Feuers, einer der stärksten Naturkräfte: Der Mensch holte sich nach einem Gewitter einen brennenden Baumast und begriff, wie er das Feuer zum Wärmen, zur Ernährung und Verteidigung gebrauchen konnte; später lernte er, wie er es durch Aneinanderreiben zweier Hölzer selber erzeugen konnte. Er wußte bald, daß man den Bären leichter erlegen konnte, wenn man nicht nur einen Faustkeil in der Hand hatte, sondern einen spitzen Stock als Stoßlanze benutzte.

Das waren zugleich Anfänge der Technik. Sie wurde – nicht zuletzt mit Hilfe des Feuers – weiterentwickelt; die Urmenschen stellten bessere Jagdwaffen, einfache Geräte und Werkzeuge her. Kein Zweifel: Sie mußten Kenntnisse erwerben, mußten denken lernen, wenn sie überleben wollten! Die Urmenschen mußten schließlich ihre Arbeitserfahrungen untereinander austauschen und sie an ihre Kinder weitergeben. Sie brauchten deshalb ein besonderes Mittel, um sich verständigen zu können, denn Zurufe und Gebärden waren dafür unzureichend. So entwickelte sich zusammen mit dem Arbeiten und Denken das Sprechen.

In seinem Stück „Leben des Galilei“ läßt Bertolt Brecht den Naturforscher Galileo Galilei im Jahre 1810 sagen: „Das Denken gehört zu den größten Vergnügungen der menschlichen Rasse.“ Sicherlich haben schon Menschen der Vorzeit Vergnügen am Denken gefunden; aber dieser Anfang war gewiß nicht leicht. Viel näher lag ihnen das Fühlen und Glauben. Den Naturgewalten standen sie hilflos gegenüber, und ihr Instinkt befahl ihnen, sich zu unterwerfen. Anfangs machten die Urmenschen aus den Naturgewalten Götter und Dämonen und suchten deren Wohlwollen durch Opfer und Gebete zu erlangen; sie brachten damit schon ein gewisses System in diesen Teil ihrer Umwelt, auch das setzte Beobachten und Denken voraus. Wir haben kein Recht, über die primitiven Anfänge erhaben zu lächeln; wo das Wissen nicht ausreichte, setzte der Glaube ein. Den Trieb zum Denken und Forschen haben unsere Vorfahren jedoch schon früh in sich ausgebildet; ohne ihn hätte sich die menschliche Gesellschaft nicht entwickelt. Die Geschichte der Menschheit ist auch die Geschichte von der Entwicklung des Denkens und dessen, was dadurch bewirkt wurde. Nur der denkende Mensch lernte das Sprechen, den Austausch und das Speichern von Gedanken und Wissen; er lernte allmählich das Lernen und bekam einen Sinn für Pflichten.

Vor etwa fünf Jahrtausenden wandelte sich die Kunst der Menschen, etwas bildlich darzustellen: Aus den Zeichnungen einzelner Dinge und Geschehnisse wurde eine Bilderschrift mit festen Zeichen für Begriffe und Worte, später Silben und zuletzt Einzelbuchstaben. Zu Beginn des 2. Jahrtausends v. u. Z. entwickelten Kaufleute und Beamte der Küstenstädte Syriens eine einfachere Schreibweise, indem sie die Hunderte von Schriftzeichen für Begriffe durch 20 bis 30 einfache Zeichen für die Laute der menschlichen Sprache ersetzten: Sie erfanden die Buchstabenschrift.

Die Menschen lernten immer mehr, ihr Denken und Tun bestimmten Zwecken unterzuordnen; sie lernten mit Baustoffen und Metallen



Römisches Wagenrennen (Relief)

umzugehen und erfanden um 3600 v. u. Z. das Rad, eine der bedeutendsten technischen Errungenschaften. Das alles geschah noch handwerklich-technisch, aus einer Sicherheit heraus, die ihre Wurzeln in Erfahrung und Begabung hatte. Auf solche Weise wurden um 644 v. u. Z. in Vorderasien geschliffene Linsen ohne Kenntnis der Gesetze der geometrischen Optik hergestellt; ja, im 26. Jahrhundert v. u. Z. baute man schon große Schiffe und Wasserstraßen, „empirisch“, wie man das nennt: aus der Erfahrung heraus, die eine lange Lehrzeit voraussetzte.

So entwickelte sich die Technik zunächst in derart vielfältigen Formen, daß die Menschen lange Zeit hindurch nicht auf den Gedanken kamen, in dieser Vielfalt und unter immer wieder anderen Umständen verbindende physikalische Grundregeln zu suchen oder gar anzuwenden; sie bedienten sich statt dessen der handwerklichen Faustregel.

Der Sternenhimmel mit seinen gleichmäßig wiederkehrenden Erscheinungen bot in dieser Beziehung einen größeren Anreiz. Schon etwa 2000 Jahre v. u. Z. begann der Mensch, die Gestirne und ihren Lauf zu beobachten und seine Beobachtungen auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Um 1770 v. u. Z. entstand in Babylon bereits ein Verzeichnis von Sternbildern und Fixsternen. Hier finden wir das Bemühen, Naturgesetze zu entdecken und mit ihrer Hilfe Naturereignisse vorzusagen. Es ist kein Zufall, daß um die gleiche Zeit auch die Mathematik ihren ersten Höhepunkt erlebte; von den Sumerern, die im südlichen Mesopotamien lebten, stammen die Zeichen für die Quadratwurzel und die Kubikwurzel.

Lange Zeit hindurch betrachteten die Forscher die Natur, wie sie sich ihnen unmittelbar darbot; auf den Gedanken, Experimente zu machen, kam man erst im 13. Jahrhundert. Man fragte bis etwa Mitte des 19. Jahrhunderts meist: Wie geschieht etwas? Erst von da an steht die Frage: Warum geschieht etwas? im Vordergrund. Auch die Reihenfolge Technik–Naturwissenschaft änderte sich: Etwa drei Viertel der Forschung dienen heute dazu, den Weg für technische Entwicklungen zu ebnen. Dieser Teil der Forschung ist eine – mathematisch gegründete – Zweckforschung geworden, das letzte Viertel freilich ist als Grundlagenforschung nicht weniger wichtig.

# An der Quelle einer Wissenschaft

Was ist Physik, und wozu ist sie da? Die Physik ist eine Wissenschaft, ein Teil der Naturwissenschaft; sie erforscht die Bewegungen und die Eigenschaften der unbelebten Natur und untersucht vor allem den Übergang von einer Bewegungsform in die andere, von einer Energieart in die andere. Wir sprechen von „klassischer“ Physik, wenn ihre Ergebnisse für uns anschaulich in Raum und Zeit sind, wie in der Mechanik, Akustik, Wärmelehre, Optik oder Elektrizität. Die „moderne“ Physik umfaßt dagegen jene Bereiche der Physik, die sich nicht anschaulich in Raum und Zeit beschreiben lassen, wie die Atomphysik und die allgemeine Relativitätstheorie.

Physikalische Erkenntnisse finden unmittelbare Anwendung in der Technik, aber auch in Verbindung mit anderen Naturwissenschaften; so entstanden die Astrophysik, Biophysik, Geophysik und physikalische Chemie. Die Physik schafft wissenschaftliche Voraussetzungen für die Technik, sie erhält jedoch von der Technik auch entscheidende Anregungen.

Im alten Griechenland hatten sich seit der Mitte des 2. Jahrtausends v. u. Z. mächtige Stadtstaaten entwickelt, die durch wirtschaftliche und kulturelle Beziehungen miteinander verbunden waren. Die hochentwickelte handwerkliche Produktion und der umfangreiche Handel erforderten immer mehr Arbeitskräfte, und die Griechen beschafften sich diese Arbeitskräfte, indem sie Raub- und Kriegszüge unternahmen oder einfach Menschen aus fremden Ländern kauften. Die Sklaven waren in der griechischen Gesellschaft bald so zahlreich wie die Freien, in Athen kamen während seiner Blütezeit um 450 v. u. Z. auf einen Freien zehn Sklaven. Sie wurden als Arbeitskräfte in den Häusern reicher Bürger eingesetzt, waren im Staatsdienst und in Tempeln tätig, arbeiteten in Werkstätten und Bergwerken oder als Ruderer auf Schiffen.

In dieser Sklavenhaltergesellschaft, die ihren Reichtum vor allem der Arbeit der Sklaven verdankte, hatten die freien Bürger Zeit

genug, um sich mit Wissenschaft und Kunst zu beschäftigen, und es kam zu großen Leistungen, die noch heute bewundert werden.

Durch ihren ausgedehnten Handel lernten die Griechen viele Länder kennen, die Seefahrt erweiterte ihr Wissen von der Gesellschaft und der Natur. So wuchs bei ihnen der Glaube an die gestaltende Kraft des Menschen, daran, daß er sich auch die Natur dienstbar machen kann. Sie erkannten an vielen Vorgängen, daß sie nicht von den Göttern verursacht, sondern natürliche Erscheinungen waren.

Die Wissenschaftler im alten Griechenland bauten dabei auf dem auf, was ihre Vorläufer erkannt und erarbeitet hatten. Thales und Pythagoras sind in Ägypten gewesen und haben sich dort über alles unterrichtet, was mit Physik, Mathematik und Technik zusammenhing. Die verschiedenen Arten der Bewegung waren ihnen bekannt; sie berechneten die Geschwindigkeit aus dem Verhältnis zwischen Zeit und Weg. Sie kannten Geräte zum genauen Messen von Entfernungen und maßen die Zeitdauer mit Sonnenuhren, Wasseruhren und Sanduhren. Sie wußten auch von den einfachen Maschinen, die Ägypter hatten sie bereits im 3. Jahrtausend v. u. Z. zum Bau von Pyramiden benutzt.

Solches Einzelwissen genügte jedoch den griechischen Forschern nicht; sie wollten die tiefsten Geheimnisse der Natur ergünden, Urstoffe und Urkräfte finden, die überall in gleicher Weise wirkten; sie wollten eine einheitliche und systematische Wissenschaft schaffen und ihre Gesetze verkünden.

Die griechischen Forscher dachten sich zu einem Problem, zu einer Frage, die Antwort aus, die ihnen richtig erschien; sie legten sie gewissermaßen ihrem weiteren Denken unter. Unterlage, Grundgedanke heißt griechisch *hypóthesis*; deshalb bildete man später für eine solche Behauptung ohne Beweis das Fremdwort *Hypothese*.

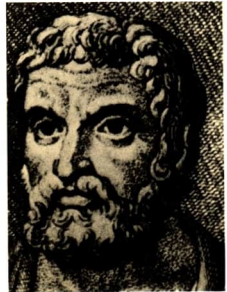
Da in der griechischen Sklavenhaltergesellschaft alle körperliche Arbeit von Sklaven verrichtet wurde, ist es selbstverständlich, daß die Forscher gar nicht daran dachten, die Natur im Experiment praktisch zu befragen und so die Richtigkeit einer Hypothese zu überprüfen. Ausnahmen bestätigen die Regel: Auch griechische Forscher der Antike haben hier und da einmal experimentiert; aber das geschah im allgemeinen ohne einen bestimmten Plan, also unsystematisch. Sie waren nicht Naturwissenschaftler im heutigen Sinne, sondern vornehmlich Naturphilosophen.

Hinzu kommt: Alles, was die Alten wußten, war Stückwerk und ließ noch keinen weiten inneren Zusammenhang erkennen; eine erste Systematik zeichnete sich nur in der Mathematik ab.

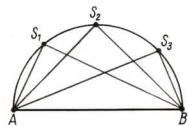
THALES aus Milet (624–546 v. u. Z.) versuchte als erster, alle Erscheinungen der Welt auf ein gemeinsames Urprinzip zurückzuführen. Das Wasser war für ihn der Urstoff aller Körper; es verwandele sich durch Zusammenziehen in einen festen Körper und durch Verdunsten in Gas. Thales führte alles Geschehen auf zwei Grundkräfte zurück: das Zusammenziehen nach einem Mittelpunkt hin und das Ausdehnen vom Mittelpunkt weg.

Um 584 v. u. Z. entdeckte Thales den Magnetismus, um 578 v. u. Z. die Anziehungskraft mit Wolle geriebenen Bernsteins. Aristoteles hat uns überliefert, daß Thales die Ursache für beide Kräfte in einer die Bewegung bewirkenden Seele sah.

Thales war ein bedeutender Gelehrter seiner Zeit; man rechnete ihn zu den „Sieben Weisen Griechenlands“. Seine philosophischen



Thales von Milet



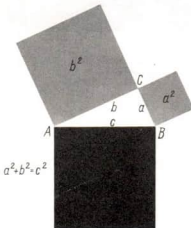
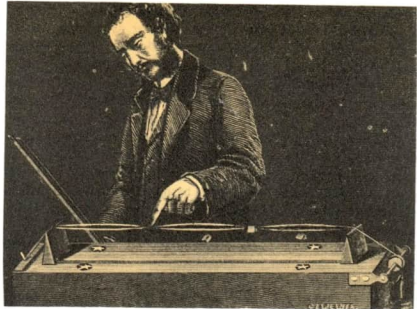
Der Halbkreis des Thales

Anschauungen führten zu weiteren Spekulationen; Bleibendes leistete er in der Geometrie und Astronomie.

ANAXIMANDER (611–546 v. u. Z.), vermutlich ein Schüler des Thales, glaubte, daß alle Dinge durch dauernde Ausscheidung gegensätzlicher Stoffe und Kräfte aus einer Ursubstanz entstünden; die Ursubstanz sei unendlich und ewig. Auch hier finden wir, ähnlich wie bei Thales, schon die Polarität, Gegensätzlichkeit und Ergänzung: Aus einer Ursubstanz sollen sich das Warme, das Kalte, das Feste und das Flüssige aussondern und wieder dahin zurückkehren. Eine Welterschöpfung wird durch das Ewige der Ursubstanz geleugnet. Eine große Gedankenleistung!

PYTHAGORAS (572–492 v. u. Z.), Mathematiker und Philosoph, gründete die Schule der Pythagoräer. Meister und Schüler lebten in einer blühenden griechischen Kolonie in der Stadt Kroton in Unteritalien. Da es damals üblich war, daß die Schüler dem Meister auch ihre eigenen Leistungen zuschrieben, spricht man heute besser von den Pythagoräern – gewissermaßen als einem Kollektiv. Die Pythagoräer sahen in der Zahl, also im mathematischen Ausdruck, die einzige Wirklichkeit; das Wichtigste an den Gegenständen sei die mathematische Beziehung, die sie miteinander verbindet. Die Körperlichkeit sei nur eine Illusion, und die Kräfte, die in den Körpern und auf diese wirken, könnten nicht ohne die Zahlen existieren, mit denen man ihre Größe und Richtung angibt. So allgemein ausgedrückt, war das ein Irrweg.

Monochord



Lehrsatz des Pythagoras

Pythagoras hat die Quadratzahl und die irrationalen Zahlen entdeckt. Er hat mit einer gespannten Saite experimentiert und das Verhältnis der Länge der schwingenden Saite zur Tonhöhe herausgefunden. Dazu benutzte er ein Monochord – ein Gerät, das wir heute noch fast unverändert in der Schule als Lehrmittel in der Akustik verwenden. Das Längenverhältnis 2:1 entspricht einer Oktave, das Verhältnis 3:2 einer Quinte und das Verhältnis 4:3 einer Quarte.

Die Pythagoräer erkannten durch Beobachtungen und Berechnungen die Erde als Kugel und als Stern unter Sternen. Sie nahmen jedoch die Bewegungen der Planeten als „harmonisch“ an; daraus



schlossen sie, daß deren Entfernungen von der Erde in den gleichen Verhältnissen stünden wie die Längen der unter gleicher Spannung stehenden sieben Saiten der Lyra, des bedeutendsten Musikinstrumentes der Griechen mit sieben Grundtönen. Die Folgerung war spekulativ, abwegig. Dieser Irrtum schmälert jedoch nicht das Verdienst der Pythagoräer, mit dem Monochord ein Naturgesetz der Akustik aufgestellt zu haben.

Ein Naturgesetz ist die – meist mathematische – Darstellung eines in der Natur objektiv vorhandenen und wirksamen Zusammenhangs zwischen Ursache und Wirkung der Erscheinungen und Kräfte. Aufgabe der Wissenschaft ist es, diese Naturgesetze zu finden und zum Wohle der Menschheit anzuwenden.

Bemerkenswert ist, daß die Pythagoräer ein Naturgesetz auf eine Art fanden, die erst zur Zeit Galileis, im 17. Jahrhundert, üblich wurde: im induktiven Verfahren (lateinisch *inducere* = hinein-führen; hier: in die Erkenntnis führen). Man geht dabei von Einzelercheinungen aus, beobachtet sie möglichst oft, vor allem im Experiment, bei dem man die Bedingungen des Ablaufs des Geschehens weitgehend selbst bestimmen und verändern kann; dann schließt man auf einen allgemeingültigen Zusammenhang, eine Regel oder ein Naturgesetz.

Im allgemeinen stellten die alten griechischen Forscher zunächst eine Hypothese auf und folgerten dann theoretisch auf eine weitere Tatsache oder Behauptung. Dieses Verfahren nennt man deduktiv (lateinisch *deducere* = herausführen, hier: aus der Hypothese herausführen).

EMPEKOKLES (490–430 v. u. Z.) forderte, daß die Menschen die Natur nicht nur erkennen, sondern auch beherrschen müßten. Das Entstehen der Dinge faßte er als eine Verbindung, das Vergehen als eine Trennung von Stoffen auf; dadurch kam er zwangsläufig auf ewig vorhandene Grundstoffe, auf die eine anziehende Kraft (beim Werden) und eine abstoßende Kraft (beim Vergehen) wirke. Die vier Grundstoffe nannte er: Feuer, Wasser, Luft und Erde. Sie wurden später als „die vier Elemente“ bezeichnet. Diese mischen und teilen sich ununterbrochen, so meinte Empedokles, aber die Summe der Materie bleibt unverändert.

ANAXAGORAS (499–428 v. u. Z.) war in mancher Hinsicht gleicher Ansicht mit Empedokles. Er glaubte aber als erster, daß die Welt aus unendlich vielen kleinen, verschiedenen Teilen bestünde, die sich bewegten, Wirbel bildeten und sich so zu Körpern verbanden. Die verbindende Kraft sei ein Geist, der Nus (Weltverstand, Weltgeist). Anaxagoras berief sich jedoch nur dann auf den Nus, wenn er die natürlichen Ursachen eines Vorgangs nicht erkannte.

Anaxagoras wußte, daß auch die Luft – ebenso wie die Planeten und Gestirne – ein Gewicht hat. Er erklärte sogar, warum Mond und Sterne nicht auf die Erde fallen: Sie drehen sich zu schnell um die Erde! Wir dürfen annehmen, daß auch Anaxagoras experimentiert hat: Er hat offenbar Schleuderversuche gemacht, ist hier also induktiv vorgegangen. Mit seiner Teilchenhypothese steht Anaxagoras in der Nähe von

LEUKIPP (489–428 v. u. Z.) und seinem Schüler DEMOKRIT (455 bis 370 v. u. Z.). Sie gingen einen Schritt weiter auf die Einheit der Materie zu:

Nach ihrer Lehre besteht die Welt aus Atomen – kleinen, nicht wahr-



Pythagoras' Gesetz der Saiten



Empedokles



DEMOCRITUS *geboren Athen*

Demokrit



Aristoteles

nehmbaren, unteilbaren (griechisch *átomos*), unzerstörbaren und wesensgleichen Teilchen. Die Atome hätten unendlich viele Formen und würden sich ununterbrochen im grenzenlosen, leeren Raum bewegen. Die verschiedenen Stoffe unterschieden sich nur durch entsprechend verschiedene Menge und Anordnung der Teilchen, je nach ihrer Gruppierung bildeten sie Dinge und Lebewesen. Die von Anaxagoras genannte Wirbelbewegung erklärte Demokrit damit, daß die Atome verschieden schwer seien und alle von oben nach unten fallen würden; die schwereren fielen schneller, stießen auf die langsameren, leichteren Atome, und dadurch ergäben sich die Wirbel, aus denen neue Stoffe entstünden.

Dem Irrtum, daß schwerere Körper im luftleeren Raum schneller als leichte fallen, sind manche Denker verfallen, unter ihnen Aristoteles. Viele Jahrhunderte – bis in die Zeit Galileis – beherrschte dieser Fehlschluß das Denken der Forscher. Die Leistung Demokrits wird dadurch nicht geschmälert; sie bestand vor allem darin, daß er – ebenso wie Anaxagoras, Leukipp und Epikur – einen sinnlich wahrnehmbaren Körper durch ein Gebilde aus nicht wahrnehmbaren Urteilchen ersetzte, die nach seiner und Leukipps Ansicht nicht einmal kennzeichnende Eigenschaften haben sollten.

Demokrit begründete, durch Leukipp angeregt, neben der Atomlehre den antiken, mechanischen Materialismus: Er erklärte auch Geist und Seele aus ihren stofflichen Grundlagen. Die Seele, so sagte er, bestehe aus besonders feinen Atomen von eigenartiger Form. ARISTOTELES (384–322 v. u. Z.), Schüler und späterer Kritiker des Philosophen Plato, beschäftigte sich mit nahezu allen Gebieten der Wissenschaft seiner Zeit und ordnete sie, unterstützt von seinen Schülern, erstmalig in einem umfassenden System. Karl Marx hat ihn den „größten Denker des Altertums“ genannt.

Während für Plato die materielle Welt (Außenwelt) nur ein Schatten der Ideen war, ging Aristoteles von den Empfindungen, die durch die Einwirkungen der Außenwelt auf die Sinnesorgane des Menschen bewirkt werden, als Grundlage allen Wissens aus. Er kam damit „dicht an den Materialismus heran“ (Lenin). Die Natur betrachtete Aristoteles als das sich Bewegende und Entwickelnde; aber am Anfang jeder Bewegung stand für ihn ein göttlicher Bewegter. Da die Himmelskörper sich ohne Bewegter bewegen, konnten sie nicht aus den vier irdischen Elementen (Feuer, Wasser, Luft und Erde) bestehen, sondern nur aus einem fünften, göttlichen Element, dem Äther. Diese Hypothese vom Äther, der die ganze Welt, auch die festen Körper, durchdringt, der gewichtslos und elastisch ist, hielt sich bis ins 19. Jahrhundert hinein, bis zu ihrer Ablösung durch die Theorie der elektrischen und magnetischen Felder.

Nicht ganz so lange, aber immerhin bis 1537, hielt sich die Auffassung des Aristoteles von der Flugbahn eines geworfenen Körpers: Eine Bahn sollte aus drei Abschnitten bestehen, einer gekrümmten Bewegung, solange der stoßende Körper den geworfenen noch berührt, einer waagerechten und einer abfallenden Bewegung. Für Aristoteles hörte mit der Ursache der Bewegung auch die Wirkung, die Bewegung, auf. Erst Galilei erkannte das Gesetz der Trägheit.

Aristoteles erwarb sich große Verdienste um die Systematisierung der Naturwissenschaften. Seine nicht auf das Experiment, sondern auf philosophische Überlegung und auf unmittelbare Anschauung

gegründete Naturphilosophie galt jedoch, ins Lateinische übersetzt und von der Kirche als unumstößlich bewahrt, bis ins Mittelalter als Norm und hemmte so die Entwicklung der Naturwissenschaft. In seinen naturphilosophischen Werken prägte Aristoteles die Begriffe Physik (von griechisch *phýsis* = Natur) und Botanik (von griechisch *botánē* = Pflanze).

ARCHIMEDES aus Syrakus (287–212 v. u. Z.) erhielt seine Ausbildung in Alexandria. Er lebte dann in Syrakus, mit dessen Herrscher er verwandt war. Archimedes wurde in Syrakus zum größten Mathematiker, Physiker und Techniker seiner Zeit.

Als Mathematiker berechnete er Kreisumfang und Kreisinhalt, Inhalt und Oberfläche von Kugel, Kegel und Zylinder, den Flächeninhalt der Ellipse und eines Parabelsegments; er löste Gleichungen dritten Grades und fand eine vereinfachte Schreibweise für große Zahlen.

Archimedes überwand die unter den Bedingungen der Sklavenhaltergesellschaft und der damit verbundenen Abwertung praktischer Tätigkeit entstandene Loslösung der Mathematik von der Physik und Technik. Er berechnete den Schwerpunkt der verschiedenen Körper und die Hebelwirkungen, den Auftrieb (Archimedisches Prinzip) und die Wichte, er fand Gesetze der Statik und der Optik. Er führte Sternmessungen durch, wies die Kugelwölbung der Weltmeere nach und baute ein Planetarium.

Als Techniker hat Archimedes etwa vierzig Maschinen erfunden, darunter Hebekräne, die endlose Schraube (die heute noch als Wasserhebemaschine benutzt wird und von der später Leonardo da Vinci sagte, sie sei nicht nur zweckmäßig, sondern auch schön in ihrer Einfachheit), den Flaschenzug.



Archimedes



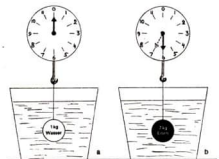
Eine alte Waage aus Theben



Die Archimedische Schraube

Als die Römer – sie waren erst kurz zuvor im Zweiten Punischen Krieg von Hannibal bei Cannae vernichtend geschlagen worden – mit den Resten ihres Heeres und ihrer Flotte im Jahre 214 v. u. Z. vor Syrakus standen, um es – wie sie dachten – schnell und leicht vom Lande und vom Wasser her zu erobern, erlebten sie eine Überraschung: Die Syrakuser wehrten sich mit Kriegsmaschinen, die nach Plänen des Archimedes gebaut worden waren.

Ein Steinhagel zwang das Römerheer zum Rückzug. Katapulte (Schleudermaschinen) schossen Pfeile und Steine in verschiedene Richtungen und Entfernungen. Auf die hölzernen Schiffe krachten plötzlich Felsbrocken und zerschlugen die Aufbauten und Schiffsrümpfe. Dann kam es noch schlimmer, und den römischen Legionären samt ihrem Feldherrn Marcellus sträubten sich die Haare: Plutarch schilderte das unheimliche Geschehen so:



Das Gesetz des Auftriebs

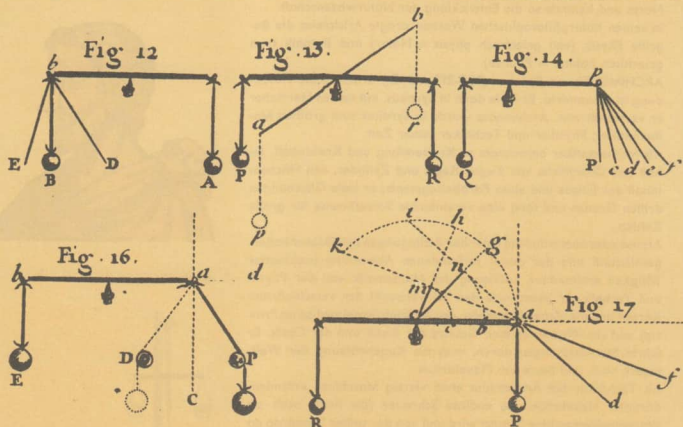


Fig. 18.

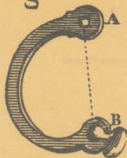


Fig. 15.

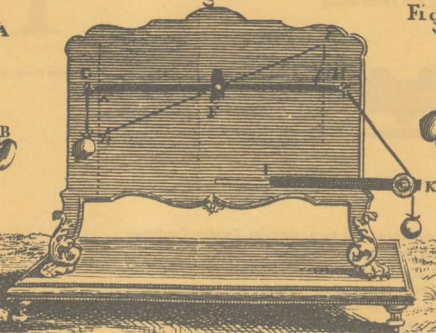
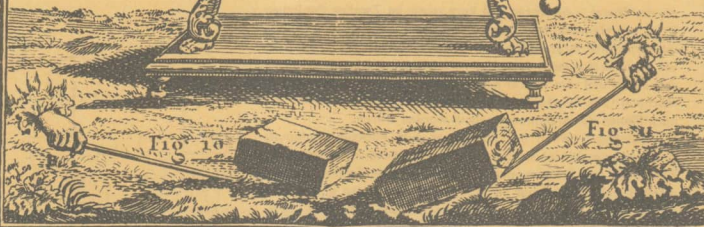


Fig. 19.



Fig. 10.

Fig. 11.



„Zu gleicher Zeit senkten sich an der Meeresseite plötzlich von der Mauer Balken herab, welche die Schiffe teils durch ihre von oben her drückende Last in den Grund bohrten, teils mit eisernen Händen oder Haken in Form der Kranichschnäbel beim Bug in die Höhe zogen und mit dem Heck ins Wasser tauchten. Noch andere drehen, durch inwendig angebrachte Gegenzüge, die Schiffe im Kreise herum und schmetterten sie zuletzt an die unter der Mauer hervorragenden Felsen und Klippen, wobei die Mannschaft auf eine jämmerliche Weise umkam. Oft hatte man den gräßlichen Anblick, daß ein aus dem Meer emporgezogenes Schiff schwebend hin und her geschwenkt wurde, bis es endlich, wenn die Leute herausgeschleudert waren, leer an die Mauer stieß oder wieder ins Meer hinabstürzte.“

Kein Wunder, daß die Römer die Nerven verloren: Sie flohen, sobald nur ein Seil oder Balken über die Mauer hinausragte. Sie glaubten, gegen Götter zu kämpfen – und kämpften doch nur gegen Kriegsmaschinen, die ein genialer, siebzigjähriger Wissenschaftler ersonnen hatte.

Erst zwei Jahre später, 212 v. u. Z., eroberten die Römer die Stadt durch List und Überrumpelung; Syrakus wurde zur Plünderung freigegeben. Der römische Feldherr Marcellus, der über die Leistungen des Archimedes im Bilde war, befahl, ihn zu schonen; vermutlich wollte er ihn für die Römer arbeiten lassen. Aber Archimedes überlebte den Tag nicht. Die Legende berichtet, daß Archimedes unbekümmert um das schreckliche Geschehen geometrische Figuren in den Sand zeichnete. Einen Legionär, der ihn zu Marcellus führen wollte, fuhr er an: „Störe meine Kreise nicht!“ Da zog der Soldat sein Schwert und erschlug Archimedes. Sein Grab wurde mit einer von einem Zylinder umschriebenen Kugel geschmückt, zur Erinnerung an die von ihm stammende Entdeckung, daß sich die Rauminhalte dieser Körper wie 2:3 verhalten.

Das Leben und Werk des Archimedes zeigt eine bemerkenswerte Stufe der Entwicklung: Die physikalischen Gesetze wurden bereits mit Hilfe der mathematischen Analyse formuliert, und sie wurden in technischen Geräten und Maschinen angewendet; zaghaft noch, aber doch deutlich wahrnehmbar. Hier liegt ein Ansatz zu der heutigen wechselseitigen Verbundenheit von Physik und Technik: Jede technische Entwicklung geht nur so weit, wie ihr physikalischer Impuls reicht; die Technik wiederum gibt der physikalischen Forschung neue Aufgaben als Impulse und liefert dazu die nötigen, oft komplizierten und aufwendigen Geräte und Anlagen.

Die Geschichte von den großen physikalischen Leistungen der Antike hat nun ihren Höhepunkt überschritten. Das alte Griechenland mit seinen Kolonien zerfiel; gegen Ende des 1. Jahrtausends v. u. Z. wurde ein anderer Sklavenhalterstaat zum Beherrscher der Länder um das Mittelmeer: das Römische Reich. Als sich die athenische Sklavenhalterdemokratie auf dem Höhepunkt ihrer Macht befand, war Rom noch ein unbedeutender Stadtstaat. Nach und nach eroberten die Römer aber ganz Italien, dann Sizilien, Spanien und Nordafrika.

Durch die Ausplünderung der Provinzen und die grausame Ausbeutung der Sklaven, die im Römischen Reich ihren Höhepunkt erreichte, gewann die herrschende Klasse Roms unermeßliche Reichtümer.



Der Flaschenzug



Fig. 42.

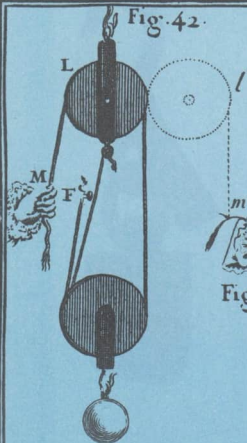


Fig. 43.

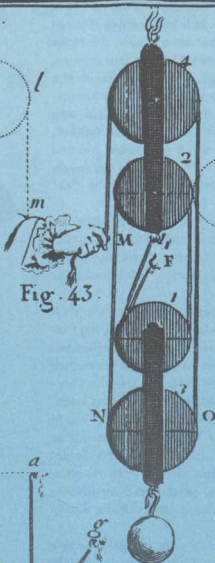


Fig. 44.

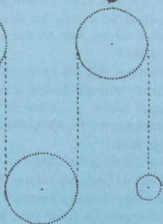


Fig. 39.



Fig. 40.

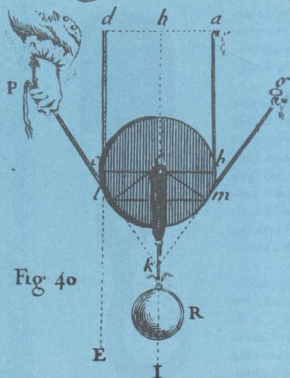
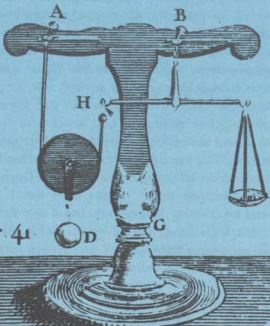


Fig. 41.



Der geistige und wirtschaftliche Mittelpunkt verschob sich von Athen nach Alexandria, an dessen Universität Euklid seine „Elemente der Geometrie“ geschrieben und an der Archimedes studiert hatte.

KTESIBIOS (etwa 285–220 v. u. Z.), ein Schüler des Archimedes, setzte die technische Anwendung von Naturerkenntnissen fort und baute verschiedene Pumpen, außerdem eine Wasserorgel, das erste byzantinische Musikinstrument mit Tasten. Im Jahre 218 v. u. Z. hatte PHILON aus Byzanz sein Thermoskop gebaut, das erste Gerät, das Temperaturmessungen möglich machte.

HERON von Alexandria (etwa 150–100 v. u. Z.), ein Schüler des Ktesibios, war wohl der größte Experimentator des Altertums. Seine Bücher weisen ihn als Mathematiker, Physiker und Ingenieur aus. Er fand um 124 v. u. Z. die „Heronische Formel“ zum Berechnen der Dreiecksfläche aus den Seiten a, b und c und der Summe der Seitenlängen 2s:

$$F = \sqrt{s(s-a) \cdot (s-b) \cdot (s-c)}$$

Heron baute die erste uns bekannte Dampfmaschine; sie arbeitet mit der Rückstoßkraft des ausströmenden Dampfes. Wegen der Kugelform ihres umlaufenden Teiles wurde sie Dampfkeisel, Aeolusball oder Aeolipile genannt.

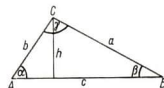
Aus einem Siedetopf wird dabei Wasserdampf durch zwei gebogene Röhren, die zugleich Lager sind, in eine in diesen Lagern drehbare Hohlkugel geleitet. Die Hohlkugel trägt – an gegenüberliegenden Stellen und in der Mitte zwischen den Lagern – zwei kurze Rohrstücke, deren rechtwinklig abgegebene Enden entgegengesetzt gerichtet sind und in der Drehebene liegen. Sobald Dampf aus diesen Enden strömt, gibt es einen Rückstoß an der Biegestelle, und die Kugel dreht sich gewissermaßen vom Dampf weg, also entgegengesetzt zur Richtung des Dampfstrahles. Dieser Strahl besteht an der Luft freilich nicht mehr aus Dampf, sondern aus vielen kleinen Wasserteilchen; der Dampf ist an der kühlen Luft sofort zu Wasser kondensiert.

Dieses Rückstoßprinzip wird heute u. a. bei allen Flugzeugen mit Strahlantrieb und sämtlichen Raketen und Raumschiffen ausgenutzt; auch der Rasensprenger mit drehbarem Kopf wird so angetrieben.

Als sehr fruchtbar erwies sich der Grundgedanke des „Heronballs“; wir nutzen ihn heute für Spritzflaschen („Zerstäuber“) aller Art. Auf die Flüssigkeit in einer Flasche wird dabei ein verstärkter Luftdruck ausgeübt – durch Blasen in eine Röhre, die von außen in den Oberteil der Flasche reicht, oder durch zusammengepreßte Luft oberhalb der Flüssigkeit.

Heron erfand auch den Heber (Siphon), eine gebogene Röhre mit verschiedenen langen Schenkeln. Durch diesen Heber fließt Wasser von selbst aus einem Behälter. Der Wasserfaden im längeren Außenschkel ist schwerer als der kürzere im Innenschkel des Behälters und will nach unten fallen. Die Kohäsion im Wasserfaden und der Luftdruck auf die Wasseroberfläche im Behälter sind weitere Voraussetzungen für das Fließen des Wassers.

Um 107 v. u. Z. baute Heron ein Windrad zum Antrieb eines Orgelbläses; etwa sieben Jahre später fand er die Regel: Was an Kraft gewonnen wird, geht an Zeit verloren. Er entdeckte das Beharrungsvermögen und lehrte, daß die Kraft eines Körpers verhältnismäßig zu dessen Masse und Geschwindigkeit sei (Newton berichtete später: Kraft ist Masse mal Beschleunigung). Er schrieb mehrere Bücher



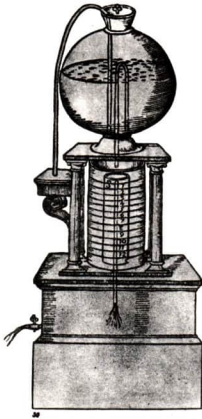
Hérons Inhaltsformel des Dreiecks



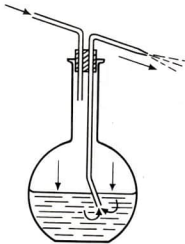
Hérons Dampfkeisel, ein Vorläufer der Dampfmaschine



Der Heronsbrunnen



Alte Wasseruhr mit Heber



Heron erfand den Zerstäuber

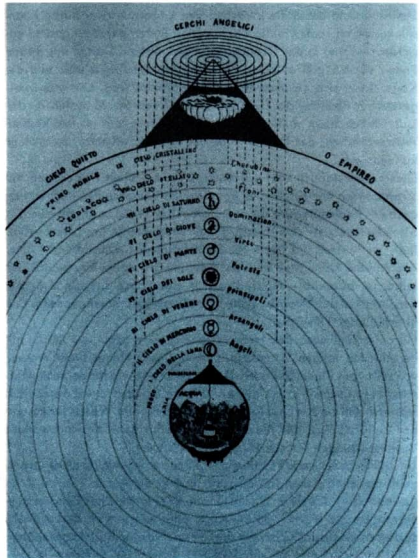
Alte geozentrische Himmelskarte

über seine Entdeckungen; dazu gehören Fragen der Reibung und der geneigten Ebene, Übersetzungen mit Zahnrädern, das Parallelogramm der Kräfte.

Auch über die Optik hat Heron sich Gedanken gemacht; in einem Buch behandelt er die Theorie der Spiegel und ihre praktischen Anwendungen. Er glaubte übrigens – wie vermutlich alle Forscher seiner Zeit –, man könne nur sehen, wenn Strahlen vom Auge ausgesandt und vom gesehenen Objekt zum Auge zurückgeworfen würden. Das war ein Irrtum. Dagegen „sieht“ heute ein Radarsystem das angepeilte Objekt auf ähnliche Weise.

Heron hat nicht nur die allgemeine Mechanik begründet, er war auch ein Meister in ihrer Anwendung, vor allem in der Kunst des Messens. Seine Meßtafeln wurden ein wichtiges Hilfsmittel der alten Baumeister. Er hat ein Nivelliermeßgerät mit Wasserwaage und Feinmeßschraube gebaut, Kurven und Wölbungen mit Hilfe der Perspektive konstruiert und eine vollständige Anleitung zum Tunnelbau mit Schachtanlagen gegeben. Auch der Wegemesser (das Taxameter) geht auf ihn zurück.

Einige Erfindungen Herons machten sich die Priester von Alexandria zunutze: so Tempeltüren, die sich durch die erwärmte Luft über den Opferfeuern scheinbar von selbst öffneten und später wieder schlossen; Vögel, die beim Öffnen der Türen die Flügel bewegten und





zwischerten; Automaten, die gegen den Einwurf von Münzen Weihwasser abgaben, und manches andere, das geeignet war, dem gläubigen Volk Wunder vorzutäuschen.

Heron war übrigens auch Pädagoge. Er gründete 91 v. u. Z. in Alexandria die erste Mechanikerschule. Sie enthielt eine Abteilung, in der die Lernenden nur an Forschungsaufgaben arbeiteten, wo sie also regelrecht Forschen lernten, eine sehr fortschrittliche Einrichtung.

CLAUDIUS PTOLEMAEUS (87–165), Geograph, Astronom und Mathematiker in Alexandria, faßte die bisherige astronomische Forschung in einem Handbuch zusammen. Das geozentrische Weltbild, das die Erde als den Mittelpunkt der Welt ansah, bekam durch ihn wieder Geltung. Dieses Handbuch wurde 827 ins Arabische und später ins Lateinische übersetzt; dadurch wirkte diese Irrlehre, von der Kirche zum Glaubensdogma erklärt, bis ins 16. Jahrhundert.

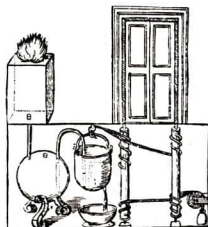
Ptolemaeus schrieb auch eine „Geographische Anleitung“; darin gab er in Tabellenform die geographische Länge und Breite von 8000 Orten der Welt an – eine große Leistung.

Auf dem Gebiet der Physik hat sich Ptolemaeus mit der Brechung der Lichtstrahlen beim Übergang von einem Medium in ein anderes beschäftigt; er machte das bekannte Experiment mit der Münze auf dem Boden eines wassergefüllten Gefäßes. Von der Seite gesehen, scheint die Münze höher zu liegen, als es wirklich der Fall ist. Ptolemaeus untersuchte die bei der Brechung auftretenden Winkel und ihr Verhältnis zueinander; er stellte Zahlentafeln auf, darunter eine regelrechte Sinustafel. Man könnte es tragisch nennen: Ptolemaeus verglich die Ergebnisse seiner Experimente nicht mit seiner Sinustafel (die er freilich nicht so nannte) – sonst hätte er den mathematischen Ausdruck für sein Brechungsgesetz gefunden: Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier Medien (beispielsweise Luft und Wasser), so ist das Verhältnis des Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels konstant. Ptolemaeus fand das Gesetz nicht; auch Kepler suchte es später vergeblich. Erst um 1620 gelang das dem Holländer Snellius.

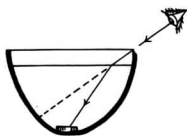
In der römischen Kaiserzeit baute man im allgemeinen auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen der Griechen auf. Während in den ersten Jahrhunderten noch ein technischer Fortschritt spürbar ist, verkümmern mit dem Niedergang der Macht im Weströmischen Reich auch die Wissenschaften.

Die Römer waren große Baumeister und Ingenieure, aber keine Naturforscher. Sie bauten bis zu 24 Meter breite, dauerhafte Straßen und große steinerne Brücken, sie legten bis zu 90 Kilometer lange Wasserleitungen, die Aquädukte: hohe steinerne Bogenreihen, die Trinkwasser von Bergen in öffentliche Brunnen und in Privathäuser leiteten. Sie errichteten luxuriöse Paläste und Badehäuser für die Sklavenhalter, sie erfanden die Zentralheizung und die Kanalisation, sie konstruierten auch den von Sklaven angetriebenen Tretkran.

Die Römer wandten das von den Griechen überlieferte physikalische Wissen an, aber sie vermehrten es nicht.



Physikalische Spielerei  
mit bewegten Tempeltüren



Ptolemaeus entdeckte die Brechung  
der Lichtstrahlen

## Die Wissenschaft wird in einen tausendjährigen Schlaf versetzt

Mit dem Zerfall der urgesellschaftlichen Verhältnisse bei den Germanen und dem Niedergang des Weströmischen Reiches im 5. Jahrhundert entstand in West- und Mitteleuropa eine neue Gesellschaftsordnung, der Feudalismus. Er beruhte auf dem Privateigentum der herrschenden Klasse der Feudalherren an Grund und Boden, den die als Hörige oder Leibeigene von den weltlichen oder geistlichen Feudalherren abhängigen und ausgebeuteten Bauern bearbeiten mußten.

Ideologische Grundlage des feudalen Staates war die christliche Religion. Klöster und Abteien wurden Mittelpunkte des geistigen Lebens. So konnte es nicht ausbleiben, daß die Theologie zur einzigen wirklich anerkannten Wissenschaft wurde und die Philosophie, zu der damals auch Physik und Mathematik gehörten, zur „Magd der Kirche“ erniedrigt wurde.

Alles, was die Religion lehrte, galt damals als unanfechtbare Wahrheit. Die Kirche sorgte dafür, daß sich niemand gegen diese Glaubenssätze auflehnte. Wer es dennoch tat, wurde in den Kerker geworfen, gefoltert oder auf dem Scheiterhaufen lebendig verbrannt. Fast die gleiche Autorität wie die christliche Religion genossen die Lehren einiger antiker Philosophen und Wissenschaftler, besonders die des Aristoteles und des Ptolemaeus, dessen geozentrisches Weltssystem die Kirche zum unerschütterlichen Hauptdogma machte: Die Erde als Mittelpunkt der Welt; alle Himmelskörper – Sterne, Sonne und Planeten – umkreisen sie gehorsam. Dieser Glaubensbefehl ist verständlich, wenn man an den Hunger der damaligen Kirche auch nach weltlicher Macht denkt; der Vatikan war Sitz der Papstkirche geworden und lag in Rom. Der Vatikan war die Wohnung des Vertreters Gottes auf Erden – also mußte die Erde auch der Mittelpunkt des Weltalls sein.

Das befohlene Hauptziel der damaligen Wissenschaft war, die Richtigkeit der Lehre der katholischen Kirche zu beweisen. So blieb

es nicht aus, daß die Gelehrten sich mit fruchtlosen Spekulationen befaßten und, anstatt Tatsachen zu untersuchen, die Forschung nur durch rein theoretische Gedankengänge in vorgeschriebenen Bahnen ersetzten.

Unter den Gelehrten aus der Zeit des Feudalismus waren aber auch kühne Geister, die sich bemühten, die Wissenschaft mit neuen Gedanken und Entdeckungen zu bereichern, und die der Verfolgung durch die Kirche trotzten.

Einer von ihnen war der englische Mönch ROGER BACON (um 1214–1294), der an der Universität Oxford lehrte. Er wandte sich gegen den Herrschaftsanspruch der Theologie über die Naturforschung. Bacon erklärte das Experiment und die Erfahrung als wichtigste Voraussetzungen jeder wahren Wissenschaft. Er lobte die



Roger Bacon

Vorzüge der Experimentalwissenschaft mit den Worten: „Sie bestätigt die Ergebnisse, die aus anderen Wissenschaften bereits gewonnen sind, vor allem die aus der Mathematik, sie dringt bis auf den Grund und an die Grenzen der Wissenschaft und sucht dort die herrlichen Wahrheiten, die sonst durch keine Mittel zu erhalten sind; sie betrachtet ihre Ergebnisse nicht in Hinblick auf andere Wissenschaften, sondern genügt sich selbst und bezieht sich auf vergangene, gegenwärtige und zukünftige Dinge und auf die Beobachtung von herrlichen Naturgesetzen, und darum ist sie die erste und die Königin aller Wissenschaften.“

Das waren mutige Worte für die damalige Zeit, wohl geeignet, die Physik aus ihrem Schlaf zu wecken. Sie waren zugleich eine Kampfansage gegen die klerikalen Mächte, die Bacon in den Kerker warfen, wo er nach vierzehnjähriger Haft starb.

# Die Wiedergeburt der Naturwissenschaft

Um die Mitte des 15. Jahrhunderts erreichte die Gesellschaftsordnung des Feudalismus in Europa ihren Höhepunkt. Die Produktion in der Landwirtschaft und im Handwerk hatte sich stark erhöht, die Städte blühten auf, und der Handel breitete sich aus. In Stadt und Land war die Naturalwirtschaft durch die Geldwirtschaft abgelöst worden.

Immer mehr verschärften sich die Widersprüche der herrschenden Gesellschaftsordnung. Während der Feudaladel zunehmend Macht und Reichtum gewann, wuchs die Ausbeutung der abhängigen Bauern. In den Städten wurden das reiche Bürgertum, die Kaufleute und die Geldbesitzer, aber auch die Handwerksgesellen und Lohnarbeiter bei der Weiterentwicklung der Produktion gehemmt.

Allmählich entstanden im Schoße des Feudalismus in Europa Keime einer neuen Gesellschaftsordnung, die den Feudalismus ablöste: die Anfänge des Kapitalismus.

Mit der Herausbildung von Frühformen des Kapitalismus und dem damit verbundenen Erstarken des Bürgertums entwickelte sich eine neue Weltanschauung: der Humanismus (lateinisch *humanitas* = Menschlichkeit). Der Einbruch frühkapitalistischer Produktionsverhältnisse in den Feudalismus erfolgte zuerst in Italien; dabei kam es in der sich von kirchlich-dogmatischen Fesseln befreienden Epoche der Renaissance (lateinisch Wiedergeburt) zu einem großartigen Aufschwung von Wissenschaft und Kultur. Ziel des Humanismus und der Renaissance war die Ausprägung eines Weltbildes, das den Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtung stellt, ihm ein zukunfts-frohes Lebensgefühl vermittelt und ihn auf die Ausbildung aller seiner Kräfte und Möglichkeiten hinweist.

Friedrich Engels bezeichnete die Epoche der Renaissance als die größte fortschrittliche Umwälzung, die die Menschheit bis dahin erlebt hatte, als eine Zeit, „die Riesen brauchte und Riesen zeugte, Riesen an Denkkraft, Leidenschaft und Charakter, an Vielseitigkeit



Leonardo da Vinci

und Gelehrsamkeit“. Viele Gelehrte gelangten auf die Höhe der wissenschaftlichen Erkenntnis ihrer Zeit und gewannen einen weltanschaulichen Überblick. Unter den Riesen der Renaissance der größte war LEONARDO DA VINCI (1452–1519), der italienische Maler, Bildhauer, Baumeister, Schriftsteller, Naturwissenschaftler und Mathematiker. In vielen seiner Arbeiten war Leonardo seiner Zeit um Jahrhunderte voraus.

Seine bedeutendste und folgenreichste Leistung für die Physik bestand darin, daß er sich von den dogmatisch erstarrten und verkrampten Lehren löste und zu einer vorurteilsfreien, objektiven Beobachtung der Natur vordrang. „Die Sonne bewegt sich nicht“, schrieb er zum Beispiel, „wie die Erde nicht inmitten des Sonnenkreises noch im Mittelpunkt der Welt ist, aber wohl in der Mitte ihrer Elemente (Planeten), die ihre Gefährten und mit ihr verbunden sind.“ Er beobachtete mit bloßem Auge – ein Fernrohr gab es damals noch nicht –, daß die helle Sichel des Mondes durch ein schwaches Licht zur vollen Kreisscheibe ergänzt wird: er erklärte diese Erscheinung richtig als Reflexion (Rückstrahlung) des Sonnenlichtes von der beleuchteten Erdseite auf den Mond: „Seine Nacht aber empfängt so viel Helligkeit, wie unsere Gewässer ihr spenden, nämlich durch die Widerspiegelung des Bildes der Sonne, die sich in allen jenen Gewässern spiegelt, welche die Sonne und den Mond sehen.“ Das Himmelsblau deutete er zutreffend als seitliche Streuung des Lichtes durch die Luftmoleküle.

Leonardo übernahm von Heron die Hebeltheorie und einige

Maschinen sowie von Archimedes die endlose Förderschraube; er entdeckte, daß die Reibungszahl von der Größe der Reibungsfläche unabhängig ist, und erfand im Zusammenhang damit Gleit- und Kugellager. Viele Experimente machte er mit der geneigten Ebene, indem er Kugeln über Rampen aus Marmor und Holz hinabrollen ließ. Dabei erkannte er, daß die Geschwindigkeit in Form einer arithmetischen Reihe zunimmt. Er zog daraus die – damals sehr kühne – Folgerung, daß ein frei fallender Körper in jeder Zeiteinheit eine gleichbleibende Beschleunigung erhält. Damit hat er Galileis bekannte Gleichung

$$h = \frac{g}{2} t^2$$

vorweggenommen.

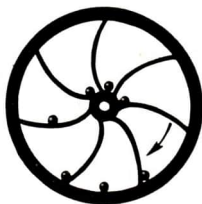
Leonardo versuchte auch, einen uralten Traum der Menschheit zu verwirklichen: eine Maschine zu bauen, die, einmal angestoßen, ewig weiterläuft und dabei möglichst Arbeit verrichten kann – einen „Immerbeweger“, lateinisch: *perpetuum mobile*. Damals wußte man noch nicht, daß bei jeglicher Bewegung ein Teil der mechanischen Energie durch Reibung in Wärmeenergie umgesetzt wird und jede Bewegung aufhören muß, wenn die verlorene Energie nicht ersetzt wird. Auch Leonardo dachte sich solch einen Immerbeweger aus, ein schweres Schwungrad, dessen zur Achse hin gebogene Speichen oben und unten Lauffrinnen für je eine schwere Metallkugel besaßen. Beim Drehen des Rades sollten die Kugeln hin und her laufen; nach dem Radkranz zu sind sie dann „schwerer“ (das Drehmoment ist größer durch den größeren Abstand von der Achse), nach der Achse zu „leichter“ (das Drehmoment ist kleiner).

Leonardo betonte den Wert der Erfahrung und des Experimentes: „Die Erfahrung geht nie fehl, sondern nur eure Urteile gehen fehl, indem sie von ihr solche Ergebnisse erwarten, wie sie bei unseren Experimenten nicht verursacht werden.“ Trotzdem scheint er seinen Immerbeweger nur entworfen, jedoch nicht gebaut zu haben; offenbar ist er durch seine Experimente mit der geneigten Ebene – vielleicht auch mit der Reibung – von der Unmöglichkeit des Immerbewegers überzeugt worden. Er warnte sogar vor solchen aussichtslosen Versuchen.

In der Mechanik, seinem physikalischen Lieblingsgebiet, verfügte Leonardo über reiche Kenntnisse. Ihm war zum Beispiel bekannt, daß sich der Schall kreisförmig von seiner Quelle ausbreitet (in einer Ebene gedacht); mehrere Schallwellen, die zusammentreffen, stören einander nicht; zwei gleiche Glocken oder zwei gleichgestimmte Saiten einer Laute ertönen in Resonanz; bei Ausbreitung und Überlagerung zweier Wasserwellen, die durch den Wind oder einen fallenden Stein entstanden sind, kann aus der Überlagerung reflektierter Wellen mit einfallenden eine Rückströmung entstehen.

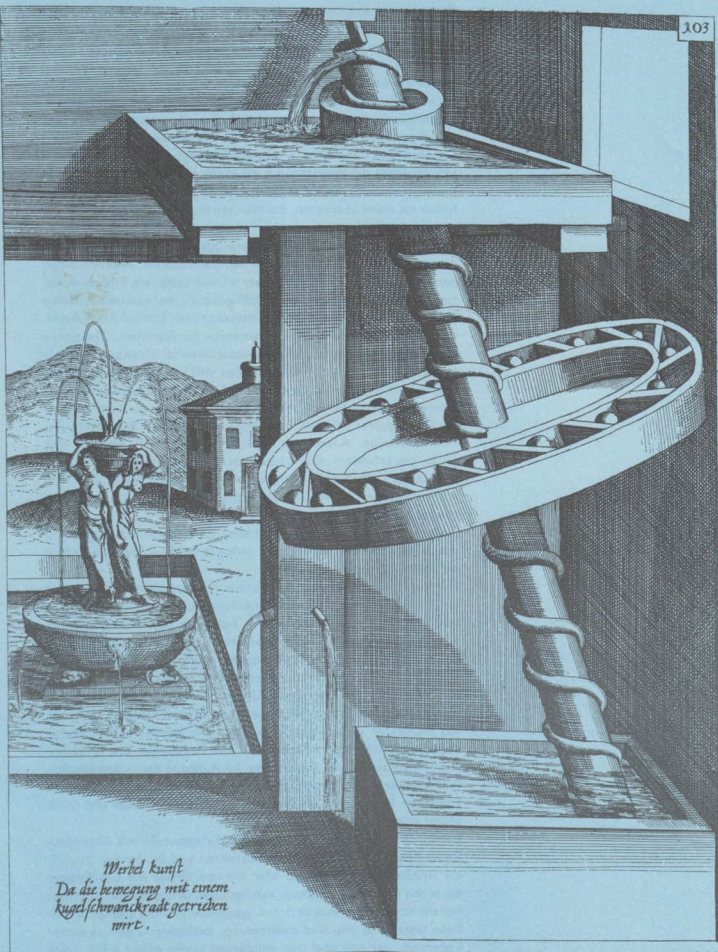
„Jeder Vorgang in der Natur vollzieht sich auf dem kürzesten Weg, der möglich ist“, schrieb Leonardo, oder: „Jeder Impuls neigt zu ewiger Dauer.“ „Kein Impuls kann gleich aufhören; er verzehrt sich mit dem Grade der Bewegung.“ Damit hat Leonardo schon die „Minimalprinzipie“ und das Beharrungsvermögen genannt.

In der Hydrostatik benutzte er das Prinzip der kommunizierenden Röhren gleichzeitig mit zwei Flüssigkeiten verschiedener Wichte und fand, daß die Höhen der Flüssigkeitssäulen im umgekehrten Verhältnis zu ihrer Wichte stehen.



Dieses Perpetuum mobile dachte sich Leonardo aus





Wirbel kunst  
Da die bewegung mit einem  
kugelschwänckrad getrieben  
wird.

Das mag als Auswahl genügen. Wir wollen noch einige Beispiele betrachten, die zeigen, was Leonardo in der „angewandten“ Physik, der Technik, geschaffen hat und wie er auch darin seiner Zeit oft voraus war.

Leonardo, übersprudelnd von genialen Ideen, hat freilich nicht alle verwirklichen können; in vielen Fällen fehlten dafür noch das gesellschaftliche Bedürfnis und manchmal auch die technischen Voraussetzungen. Nach ihm haben andere die Dinge dann nacherfunden.

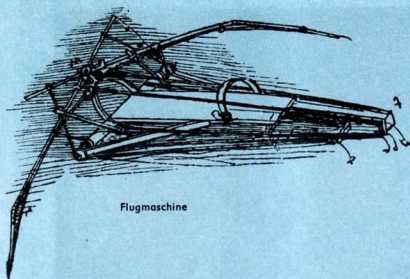
Die Herrschenden, denen er seine Erfindungen anbot, sind vermutlich oft durch die Neuartigkeit, die ihnen phantastisch vorkommen mußte, und durch die hohen Baukosten abgeschreckt worden; dabei haben sie vieles übersehen, das man mit Nutzen hätte herstellen und verwenden können.

Einige von Leonardos Entwürfen seien hier genannt: ein Bagger für die von ihm in großer Zahl geplanten Kanalbauten; ein Erdbohrer, der wie ein heutiger Korkenzieher wirken sollte; ein Flammenofen zum Eisenschmelzen (erst nach 1600 gebaut); mechanische Antriebe für Tuschermaschinen, Feilenbaumaschinen, Nadschleifmaschinen, Seilwinden und Kräne; Walzwerke für Bleitafeln, Ziehbänke für flache Metallbänder; Seilspinnmaschinen für Drahtseile; Ketten in der Art der heutigen Fahrradketten (1832 neu erfunden); Windmühlen mit drehbarem Oberteil (nach 1550 den Holländern zugeschrieben); Rettungsringe und Schwimmschläuche; ein Rettungsgerät bei Feuersgefahr (1802 als Erfindung veröffentlicht); Taucherglocke, Taucheranzüge, Ausrüstung für „Froschmänner“; Hörrohr (im 17. Jh. neu erfunden); eine Schleifmaschine für große Parabolspiegel, Radschiffe, Luftschraube, Flugzeuge der verschiedensten Art; Fallschirm; Meßgeräte; Musikinstrumente, auf denen er ausgezeichnet spielen konnte.

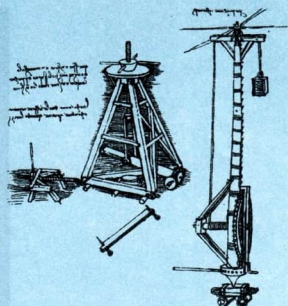
Einige seiner Flugmodelle hat Leonardo vermutlich gebaut, wir wissen jedoch nicht, ob er damit geflogen ist. Gleitflüge wären ihm sicherlich gelungen.

Hervorzuheben sind auch Leonardos großartige Städteplanungen mit Straßen in verschiedenen Höhenlagen, unterirdischer Kanalisation und mit kleinen Wohnstädten nahe der zentralen Großstadt. Auf diesen Gedanken war er gekommen, als er sah, wie die Pest in der dichtbewohnten Innenstadt von Mailand mit ihren unvorstellbar schlechten sanitären Verhältnissen wütete. Er entwarf Fertighäuser mit Wasserleitung, Heizung, Klosett, Feuerung, dazu eine frei schwebende, sich kreuzende Doppeltreppe, die allerdings erst heute aus Stahlbeton gebaut werden kann. Seine Straßen sollten breite, doppelte Fahrbahnen erhalten; für die Fußgänger sah er Hochstraßen auf steinernen Sockeln vor. Im Auftrage des türkischen Sultans zeichnete und berechnete er eine Brücke über das Goldene Horn am Bosphorus; sie sollte auf beiden Ufern ruhen und „sich selber stützen“.

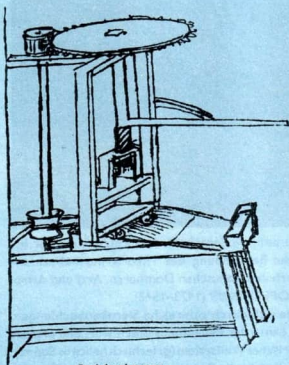
Leonardo entwarf auch Kriegsgesetz: Kriegsschiffe mit doppeltem Boden; Panzerwagen, mit Geschützrohren und Beobachtungsturm, für Handantrieb; Geschütze aller Art und Größe mit Geschossen, die schon die Stromlinienform von heutigen Granaten und Patronen hatten, Hinterlader waren dabei, gezogene und mit Dampf betriebene Geschütze, ein- und mehrrohrig; explosive Kugeln in einem Ledersack, der sich über den feindlichen Linien öffnen sollte; tragbare Brücken. „Froschmänner“ sollten die feindlichen Schiffe unter



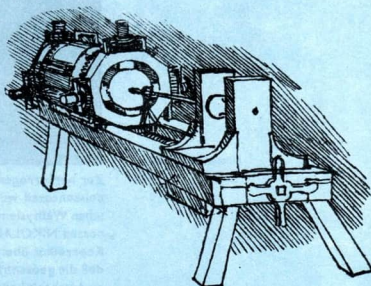
Flugmaschine



Hebezeuge



Buchdruckpresse



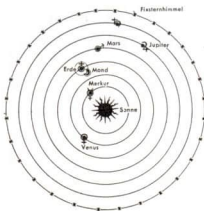
Bohrmaschine

Wasser anbohren und mit Schraubenspindeln auseinandersprengen.

Der Italiener Leonardo da Vinci konnte sich zum genialsten Vertreter der in der Renaissance aufblühenden Wissenschaften und Künste entwickeln, weil Italien damals von allen Ländern Europas wirtschaftlich am weitesten entwickelt war. Er lebte am Beginn eines großen Umbruches, des Überganges von der kirchlichen, katholisch-dogmatischen Weltanschauung zu einer neuen, freieren Geisteshaltung, die endlich auch den Naturwissenschaften Möglichkeiten zur Entfaltung gab. Selbstverständlich gab die Kirche ihre Diktatur nicht freiwillig auf; es mußten noch viele und schwere Kämpfe geführt werden, bis das Dogma durch wissenschaftliche objektive Erkenntnis abgelöst wurde.

Einige von Leonardos genialen Erfindungen

Nikolaus Kopernikus



Das Weltsystem des Kopernikus

Zur hervorragendsten naturwissenschaftlichen Entdeckung der Renaissancezeit wurde die Begründung der Theorie des heliozentrischen Weltsystems durch den polnischen Domherrn, Arzt und Astronomen NIKOLAUS KOPERNIKUS (1473–1543).

Kopernikus überzeugte sich durch zahlreiche Sternbeobachtungen, daß die geozentrische Lehre des Ptolemaeus falsch war, und ersetzte sie durch sein heliozentrisches Weltsystem (griechisch helios = Sonne): Im Mittelpunkt der Welt steht die Sonne, die Erde ist nur einer der Planeten, die sie umkreisen. Kopernikus hielt jedoch an der Vorstellung fest, daß sich die Planeten auf Kreisbahnen bewegen. Die scheinbare Drehung der Gestirne erläuterte er als Folge der Drehung der Erde um ihre Achse.

In seinem 1543 veröffentlichten Werk „De revolutionibus orbium coelestium“ („Über die Umlaufbewegungen der Himmelskörper“) beschrieb er unter anderem die Reihenfolge der Planetenbahnen und fuhr dann fort: „In der Mitte aber von allem steht die Sonne. Denn wer möchte in diesem schönsten Tempel die Leuchte an einen anderen oder besseren Ort setzen, als von wo aus sie das Ganze zugleich erleuchten kann? Wenn anders nicht unpassend nennen einige sie die Leuchte der Welt, andere die Seele, noch andere den Regierer. So lenkt in der Tat die Sonne, auf dem königlichen Throne sitzend, die sie umkreisende Familie der Gestirne.“

Die neue Lehre des Kopernikus war eine überaus große Leistung. Von nun an entwickelte sich die Wissenschaft mit Riesenschritten. Der Forscher wußte freilich genau, daß er damit das kirchliche



Dogma von der Erde als festem Mittelpunkt der Welt angegriffen hatte, und wagte es erst an seinem Lebensabend, seine Lehre zu veröffentlichen. In einem Vorwort schrieb der Verleger, daß die Schrift nur „hypothetische Ideen“ und keine Beschreibung der Wirklichkeit enthalte. Er wollte dadurch die Anklage wegen Gotteslästerung vermeiden.

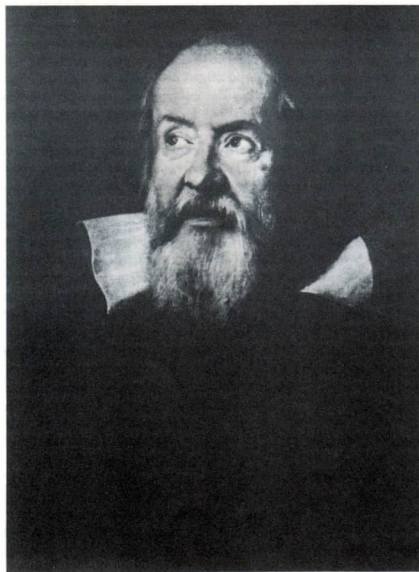
Im Laufe der Zeit wurde die Lehre des Kopernikus in eine genauere Fassung gebracht. Der Italiener GIORDANO BRUNO (1548–1600) zog daraus philosophische Schlüsse und erkannte, daß unser Sonnensystem nur eines unter vielen ist und daß die Welt durch „innere (physikalische) Kräfte“ bewegt wird. Das unendliche Weltall sei den gleichen ewigen Gesetzen unterworfen.

Den Mut, seine Lehre zu verkünden, mußte er mit der Verfolgung durch die Inquisition, mit Gefängnis und schließlich mit dem Tode auf dem Scheiterhaufen büßen.

Dem italienischen Gelehrten GALILEO GALILEI (1564–1642) gelang es, einen neuen Weg zu finden, der noch heute als Methode der naturwissenschaftlichen Forschung gültig ist. Galilei lehnte die naive, ungeordnete Naturbeobachtung ab und forderte, daß am Anfang einer jeden Forschungsarbeit eine zielgerichtete Frage steht. Der Naturvorgang könne wohl der Anlaß zum Nachdenken sein, müsse jedoch von störenden Nebenerscheinungen befreit werden, um das



Giordano Bruno



Galileo Galilei

Wesentliche des Vorgangs, den man untersuchen will, erkennen zu können. Dabei sei es durchaus möglich, daß sich der Gesamtvorgang in mehrere Einzelvorgänge aufteile; dann müsse man sich denjenigen herausgreifen, der einem am wichtigsten erscheint.

Nach der Erkenntnis Galileis stellt man also zuerst einmal fest, was man wissen möchte; man stellt sozusagen eine bestimmte Frage an die Natur. Oft hat man schon eine Vermutung, eine Hypothese, wie die Sache ablaufen wird. Dieses Denken, gewissermaßen ein „Vor-denken“, ist die erste Stufe der Erkenntnis; sein Erfolg ist davon abhängig, ob man die Frage genau genug gestellt hat. Dann kommt das Experiment! Da die dritte und letzte Stufe das Auswerten ist, steht das Experiment im wahrsten Sinne des Wortes im Mittelpunkt. Der Experimentator richtet also sein Augenmerk auf einen bestimmten Ausschnitt der Natur, um zu beobachten und zu messen.

In den meisten Fällen ahmt der Wissenschaftler die Natur im Experimentiergerät sogar nach, um Fehlerquellen zu vermeiden und noch besser beobachten zu können. Er kann dann auch leichter die Versuchsbedingungen bestimmen oder ändern und den Versuch wiederholen. Das wird er im allgemeinen sehr häufig tun, um irritierende Nebeneinwirkungen und Fehlerquellen immer mehr auszuschalten und um zu einem möglichst genauen Ergebnis zu kommen. Daß das nur bis zu einem gewissen Grade möglich ist, erkannte auch Galilei bald; er wußte beispielsweise, daß die Luft als Medium den freien Fall bei seinen Experimenten störte.

Stimmen die Versuchsergebnisse mit der Hypothese zuverlässig überein, so hat man eine Regel oder ein Naturgesetz gefunden. Gab es vorher keine Hypothese, so zeigen die Werte der Messungen im günstigen Falle den gesuchten Zusammenhang. Sind die Ergebnisse unbrauchbar, muß man umdenken, verändern und erneut beginnen.

Das alles hatte Galilei als erster erkannt und mit dieser Methode der Forschung die wissenschaftliche Physik, für die Roger Bacon bereits den Begriff Experimentalwissenschaft geprägt hatte, begründet.

Zu Galileis bekanntesten Entdeckungen gehören die Gesetze des freien Falles, mit denen er die Ansicht des Aristoteles über die Fallbewegung widerlegte. Galilei überlegte zunächst: Wenn Aristoteles recht hat, so fällt ein Körper mit der Masse  $2m$  doppelt so schnell wie einer mit der nur halb so großen Masse  $m$ . Lasse ich zwei gleich schwere Steine einzeln fallen, dann fallen sie sicherlich gleich schnell. Bände ich aber beide zusammen, so bildeten sie einen einzigen Stein mit der doppelten Masse des einzelnen. Dieser Doppelstein müßte nun doppelt so schnell fallen. Galilei kam bei diesem Gedankenexperiment zu der Meinung, die Steine müßten gleich schnell fallen, einerlei, wie groß ihre Masse sei. Wenn man aber zwei Körper aus verschiedenen Stoffen nähme, so müßten sie verschieden schnell fallen, meinte Galilei irrtümlich und schrieb in seinem Buch „Über die Bewegung“ („De motu“), daß Blei schneller als Holz fällt. Er habe das „oft nachgeprüft“.

Diese Versuche hat er übrigens nicht, wie die Legende berichtet, am Schiefen Turm zu Pisa durchgeführt, sondern vermutlich in Padua, wo er von 1592 bis 1609 lebte und lehrte. Auf die Idee, daß alle Körper – welcher Masse auch immer – gleich schnell fallen, kam er durch die gedankliche Vorstellung des luftleeren Raumes.



Den konnte er allerdings nicht herstellen – und dadurch seine Vermutung auch nicht beweisen.

Als Galilei die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers näher untersuchen wollte, gab er ein Musterbeispiel seiner neuen Methode: Er kam zunächst zu dem Entschluß, nicht nach den Ursachen, nach dem Warum? des Fallens, sondern nach dem Wie? zu fragen. Dies war eine weise Beschränkung, die viele Nebenfragen und Schwierigkeiten ausklammerte. Daß die Geschwindigkeit beim Fallen ansteigt, war sicher. Die nächste Frage Galileis war daher: Steigt sie proportional den Fallzeiten oder proportional den Fallstrecken an? Er entschied sich für die Annahme, daß beim freien Fall eine gleichförmig beschleunigte Bewegung vorliegt, also für die Abhängigkeit der Geschwindigkeiten von den Fallzeiten.

Mit bloßem Nachdenken kam er nun nicht mehr weiter: Er mußte die Natur im Experiment befragen. Galilei sagte sich: Ich habe trotz meiner schönen Wasseruhr nicht die technische Möglichkeit, die Geschwindigkeit eines frei fallenden Steines in den kurzen Zeitabschnitten zu messen; dazu fällt er viel zu schnell. Aber wenn der vermutete Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Zeitablauf wirklich besteht, dann muß ich ihn gleichfalls, nur bei viel langsamerem Ablauf und besserer Meßbarkeit, auf einer geneigten Ebene, einer „Fallrinne“ vorfinden, auf der ich eine Kugel herabrollen lasse! Mache ich den Neigungswinkel dieser Rinne ständig größer, so läuft die Kugel zwar immer schneller, aber das Verhältnis der Geschwindigkeiten und durchlaufenen Wege in den einzelnen Zeitabschnitten muß doch unverändert sein. Stelle ich die Rinne schließlich im größten Neigungswinkel, also mit 90° auf, dann steht sie senkrecht, und ich habe den freien Fall und eine wirkliche „Fall“-Rinne.

Galilei baute seine bekannte Fallrinne, machte den Versuch „in wohl hundertfacher Wiederholung“, wie er schrieb, und fand seine Annahme bestätigt. Er hatte damit das Naturgesetz gefunden, das für alle freien Fallbewegungen gilt: Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers nimmt daher mit wachsender Zeit stetig mit der Erdbeschleunigung zu:

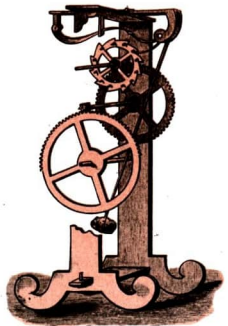
$$v = g \cdot t$$

Die in den einzelnen Zeiteinheiten  $t$  zurückgelegten Strecken verhalten sich wie 1:3:5:7 usw.; die gesamte Strecke (Fallhöhe) ist

$$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$$

Wir wollen betonen: Nicht nur das Fallgesetz entdeckte Galilei; er benutzte bei dieser Entdeckung als erster die moderne, noch heute gültige Forschungsmethode und löste sich damit aus den Fesseln naiver Naturbeobachtung und dogmatischer Entscheidungen. Er wies dadurch der Physik den richtigen Weg. Das war seine überragende Leistung! Der Fluß der Physik konnte nun schneller anwachsen.

Galilei untersuchte und entdeckte noch manches andere in der Mechanik: die Gesetze des Pendels, des freien Wurfes und anderer Bewegungen. Er beschäftigte sich auch mit der Festigkeitslehre. Als er hörte, daß in den Niederlanden ein Fernrohr konstruiert worden sei, beschloß er, ebenfalls solch ein Gerät zu bauen. „Ausgehend von der Lehre über die Strahlenbrechung“, so schrieb er, „kam ich der



Die von Galilei erfundene Pendeluhr



Galileis Fernrohr

Sache bald auf die Spur. Zunächst verschaffte ich mir eine Bleiröhre, an deren einem Ende ich eine plankonvexe und an dem anderen Ende eine plankonkave Linse anbrachte.“ Mit diesem Fernrohr, das eine dreißigfache Vergrößerung gestattete, beobachtete er Nacht für Nacht den Sternenhimmel und entdeckte immer neue Dinge, die für die damalige Zeit fast unvorstellbar waren. Dabei fand er auch eindeutige Beweise für die Richtigkeit des kopernikanischen Welt-systems. Galilei sah die Mondkrater, die Schwankung der Mondachse, die Jupitermonde, er stellte fest, daß sich die Milchstraße aus Fixsternen zusammensetzt – und vieles andere.

Es ist nur zu verständlich, daß er in seiner Begeisterung das Geschaute überall verkündete. 1632 kam sein Buch „Dialogo dei due massimi sistemi del mondo“ („Dialog über die beiden Weltsysteme“) heraus, in dem er die Lehre des Kopernikus erläuterte. Er hatte es zwar so geschrieben, als sei alles nur eine Hypothese, doch die Inquisition sah auch darin schon eine Gefahr für die Kirche. Der Papst verbot das Buch und leitete das schändliche Verfahren ein, das zu Galileis Verurteilung führte.

Galilei konnte zwar beweisen, daß er recht hatte, und forderte die hohe Geistlichkeit auf, sich mit einem Blick durch das Fernrohr davon zu überzeugen – aber sie lehnte ab.

Galileis Lage war sehr schwierig. Er verteidigte noch eine Zeitlang seine Meinung, wurde jedoch am 22. Juni 1633 als kranker Mann von 69 Jahren vom Gericht verurteilt, seine Lehre zu widerrufen. Er tat es. Das Gericht „begnadigte“ daraufhin Galilei zu lebenslangem Freiheitsentzug; er durfte fortan sein Landhaus bei Florenz nicht mehr verlassen. Hier in der Abgeschiedenheit schrieb er, durch Krankheit – vor allem durch die fortschreitende Erblindung – immer stärker behindert, sein Werk „Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend“, mit dem er die theoretische Physik begründete. Es gelang ihm, die Urschrift in die protestantischen Niederlande zu schmuggeln; in Amsterdam wurde das Buch 1638 veröffentlicht. Galilei starb, erblindet und lebensmüde, im Jahre 1642.

Hatte Galilei ein moralisches Recht zu seinem Widerruf? Er befand sich in einem tiefen Konflikt: Einerseits war er der kluge, weltoffene und fortschrittliche Naturforscher, auf der anderen Seite der aufrichtig fromme Katholik. Sein tragischer Konflikt ließ ihn nur zwischen zwei Lösungen entscheiden, die beide bitter für ihn waren: Er konnte sich furchtlos und in Selbstachtung, ein Vorbild für seine Anhänger, zu der Wahrheit, die er gefunden hatte, und zu Kopernikus bekennen – in der Gewißheit, dann in den Kerker geworfen oder auf dem Scheiterhaufen verbrannt zu werden; oder er konnte abschwören, durch den Meineid sein Leben retten und sein wissenschaftliches Werk vollenden.

Er entschied sich für den zweiten Weg: sich von seinen „Verirrungen“ loszusagen.

Im Sommer 1968 hat die katholische Kirche den in Lindau am Bodensee versammelten Nobelpreisträgern erklärt: Das Urteil gegen Galilei wird – 335 Jahre nach seiner Verkündung – offiziell revidiert, das heißt als Irrtum anerkannt, und Galilei freigesprochen. . .

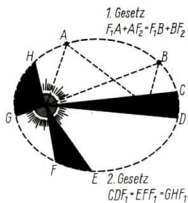
JOHANNES KEPLER (1571–1630) studierte zunächst protestantische Theologie, widmete sich dann aber der Mathematik und Astronomie. Er war mit Galilei durch Briefwechsel freundschaftlich verbunden

und kannte dessen Himmelsbeobachtungen mit Hilfe des Fernrohrs. Als begeisterter Anhänger des Kopernikus setzte er dessen Forschungen mit großem Erfolg fort und verhalf damit dem neuen Weltbild zum Durchbruch.



Johannes Kepler

Kepler, stark religiös, empfand seine Naturforschung als Dienst am Werke des Welterschöpfers; Forschung bedeutete für ihn, das zu verstehen und zu verkünden, was Gott als Ordnung der Natur geschaffen hatte. Er glaubte, in der Geometrie kleine, ausgezeichnete Zahlenverhältnisse gefunden zu haben, die Gott bei der Erschaffung der Welt die Bausteine lieferten. Er fand sie als Urharmonien in der Musik, in den Bewegungen der Planeten und im himmlischen Gesang der Sphären (Himmelskugel). So mischte er exakte Wissenschaft mit übersinnlichen Weisheitslehren alter Zeit. Diese Einstellung hinderte Kepler jedoch keineswegs, seine astronomische Forschung auf Tatsachen und Erfahrungen aufzubauen. Er wertete die zahlreichen Beobachtungen des dänischen Astronomen TYCHO BRAHE (1546–1601) aus und fand mit ihrer Hilfe die Gesetze der Planetenbewegung. Kepler verbesserte die Beobachtungsergebnisse mit Hilfe eines neuartigen Fernrohrs, das er mit zwei und drei bikonvexen Linsen berechnete. Er veröffentlichte die Konstruktion des neuen Fernrohrs 1611. Zwei Jahre später baute es der Jesuitenpater Christoph Scheiner nach dieser Anleitung und beobachtete



Zeichnung zum ersten und zweiten Keplerschen Gesetz

damit die Sonnenflecke. Sein Fernrohr hatte eine stärkere Vergrößerung und größere Helligkeit. Allerdings kehrte es die Bilder um. Für das Beobachten irdischer Objekte war das eine unangenehme Begleiterscheinung, aber beim Beobachten der Himmelskörper störte sie kaum. Keplers Fernrohr heißt daher auch astronomisches Fernrohr.

Kepler entdeckte in jahrelanger Arbeit, daß sich die Planeten nicht, wie Kopernikus angenommen hatte, auf Kreis-, sondern auf Ellipsenbahnen bewegen, wobei sich die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipsen befindet (1. Keplersches Gesetz). Er fand weiterhin, daß sich die Planeten um so schneller bewegen, je näher sie sich der Sonne befinden (Perihel), und um so langsamer, je weiter sie von ihr entfernt sind (Aphel). Den Zusammenhang der Geschwindigkeit des Planeten und seiner Entfernung von der Sonne in den einzelnen Punkten der Planetenbahn nennt das 2. Keplersche Gesetz: Eine gedachte Verbindungslinie zwischen der Sonne und dem Planeten bestreicht in gleichen Zeitabschnitten gleiche Flächen der Umlaufbahn des Planeten. 1609 hat Kepler diese beiden Grundgesetze der Planetenbewegung veröffentlicht. Sie sind die ersten Naturgesetze in mathematischer Fassung und zugleich ein Musterbeispiel der induktiven Forschungsmethode.

In neun Jahren Forschungsarbeit machte Kepler seine großartigste Entdeckung: Die Quadrate der Umlaufzeiten der verschiedenen Planeten um die Sonne stehen im gleichen Verhältnis zueinander wie die Kuben ihrer mittleren Entfernungen von der Sonne. Das ist das 3. Keplersche Gesetz. Zahllose Beobachtungen, Zahlentafeln und Vergleiche waren nötig gewesen, um es zu finden.

Kepler begründete mit diesen Gesetzen die Himmelsphysik und führte die Bewegung der Planeten auf die gleichen Kräfte zurück, die auch den Stein auf die Erde fallen und das Pendel nach seinem tiefsten Punkt wieder aufwärts schwingen lassen – auf die Schwerkraft und die Trägheitskraft.

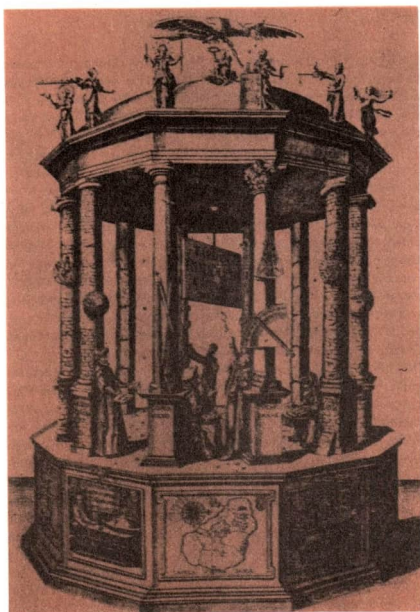
Galilei und Kepler vollzogen um 1600 den Übergang vom mittelalterlichen zum modernen naturwissenschaftlichen Denken und Forschen. Aber es ging immer noch um die Frage: Wie geschieht es, wie bewegen sich die Planeten? Mehr als ein halbes Jahrhundert dauerte es noch, bis die Frage nach dem Warum? exakt beantwortet werden konnte.

Kepler hat viele Bücher veröffentlicht. Drei ragen hervor: „Mysterium cosmographicum“ („Weltgeheimnis“), „Astronomia nova“ („Neue Astronomie“) und „Harmonices mundi“ („Weltharmonien“). In der „Astronomia nova“ veröffentlichte er die Riesentabellen Tycho Brahes, aus denen er seine ersten beiden Naturgesetze gefolgert hatte.

Bemerkenswertes leistete Kepler auch für die Physik. Sein Werk „Dioptrik“ behandelt die Lehre von der Lichtbrechung und den darauf beruhenden wissenschaftlichen Hilfsmitteln; damit begründete er die Optik. Er formulierte als erster das Gesetz von der Abnahme der Lichtstärke mit dem Quadrat der Entfernung; er erläuterte die Art des Sehens und die Strahlenwege im Auge, das stereoskopische Sehen, die Totalreflexion, den Ort der Spiegelbilder, das Teleobjektiv.

Kepler verkörperte in überzeugender Weise den Übergang von der religiösen Naturbeobachtung der Antike zur wissenschaftlich-

materialistischen Naturforschung. Er begann – selbst im Irrtum scharfsinnig denkend – mit der Sphärenmusik, mit „himmlischen Intelligenzen“ und „Seelenkräften“ auf festen, durchsichtigen Sphären oder Kugelschalen; er stieß über seine „Weltharmonien“ und die geniale Auswertung und Mathematisierung der Beobachtungen Tycho Brahes tief in die Wirklichkeit vor – zu seinen Planetengesetzen. Von nun an war die Entwicklung nicht mehr aufzuhalten, andere Forscher führten die Arbeit weiter und fügten weitere Bausteine in das größer werdende Abbild der Natur ein: Torricelli, Guericke, Newton und andere. Der Fluß der Physik wurde schiffbar und begann, im Leben der Menschen allmählich eine Rolle zu spielen. Sein Leben lang litt Kepler finanzielle Not. Die kaiserliche Hofkasse auf der Prager Burg schuldete ihm schließlich 12000 Gulden. So mußte er Horoskope stellen, Kalender verfassen und verkaufen, um sein Leben zu fristen. Er liebte die Sterndeuterei nicht, die, wie er schrieb, „nährische und liederliche Tochter der Himmelskunde“. Im Jahre 1630, mitten im Kriege, ritt er zum Reichstag nach Regensburg, um dort sein Gehalt anzufordern. Er starb, 59 Jahre alt, an den kraftzehrenden Folgen der Reise.



Titelbild  
der Rudolphinischen Tafeln (1627)

## Physik und Mathematik verbünden sich

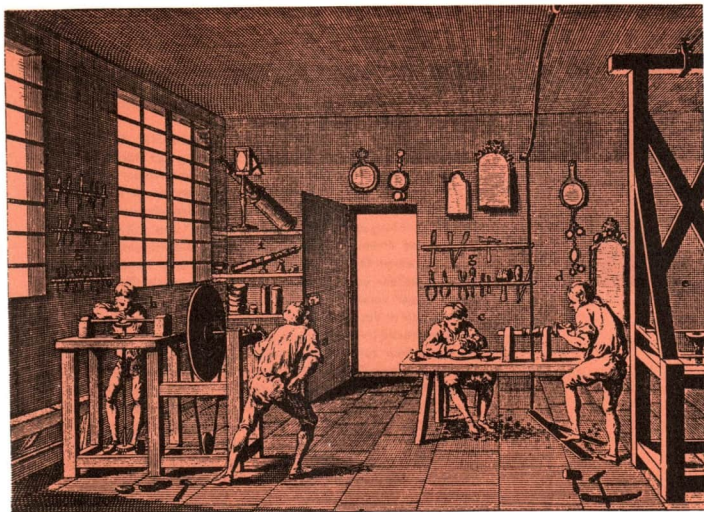


René Descartes (Cartesius)

Die Kirche versuchte mit allen Mitteln, die Entwicklung einer neuen, fortschrittlichen Wissenschaft und Philosophie zu hemmen. Aber das erstarkende Bürgertum, das dem Feudalismus die Grundlagen entzog, bereitete der neuen Weltanschauung den Weg. Einer ihrer charakteristischen Vertreter war der englische Philosoph FRANCIS BACON (1561–1626), der eigentliche Begründer des Materialismus. Er forderte, daß sich jede Wissenschaft auf das Studium der materiellen Welt, der Natur, gründen müsse. Er erkannte den hohen Wert der Erfahrung und des Experimentes. Nach seiner Meinung sollte man, um eine Erscheinung zu erkennen, möglichst viele Versuche unternehmen und sie miteinander vergleichen. Was dabei in allen Fällen beobachtet würde, sei dann das Ergebnis. Das war zwar ein Fortschritt gegenüber planlosem Probieren, wie es etwa die Alchimisten taten, Bacons Verfahren ist jedoch nicht identisch mit dem, was wir heute unter „experimentieren“ verstehen. Nur der Grundgedanke war richtig: Vom Einzelnen kommt man zum Allgemeinen. Er liegt dem induktiven Experimentieren zugrunde.

Daß die Physik ebenso wie die Astronomie und Geographie mathematisches Wissen erfordert, darauf hatte schon Leonardo da Vinci hingewiesen. In der ersten Hälfte des 17. Jh. erweiterte der französische Gelehrte RENÉ DESCARTES (1596–1650) die Mathematik dadurch, daß er die analytische Geometrie schuf. Als Philosoph zweifelte Descartes an der Wahrheit der Sinneseindrücke, also der Beobachtung. Nach seiner Ansicht kann man alle Erkenntnis nur aus der Vernunft und dem mit ihr verbundenen Denken (deduktiv) gewinnen. Zutiefst beeindruckt von der Mathematik, wollte er nur die Theorien gelten lassen, die mathematisch darstellbar sind; aber auch nicht alle mathematisch erfassbaren Ideen, sondern nur eine Auswahl von „Grundideen“: Jeder Körper beharrt so lange in seinem Zustand, bis ein fremder Einfluß ihn ändert; die Menge der von Gott bei der Schöpfung gegebenen Bewegung (von Descartes als Masse





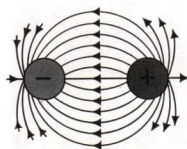
Linsenschleiferei

mal Geschwindigkeit erläutert) bleibt stets unverändert; jeder Körper sucht seine Bewegung in gerader Linie fortzusetzen. Atome und Vakuum waren für Descartes unvorstellbar.

Descartes beschäftigte sich viel mit der geometrischen Optik und fand über die analytische Geometrie das Brechungsgesetz der Lichtstrahlen. Descartes baute eine Maschine zum Schleifen parabolischer Linsen und scheint als erster magnetische Feldlinien mit Hilfe von Eisenfeilspänen dargestellt zu haben. Wie viele Forscher des Altertums glaubte auch er nur an eine Kraftübertragung durch unmittelbaren Kontakt (*vis impressa* = eingeprägte Kraft); die magnetische Anziehung der Eisenspäne erklärte er daher durch winzige unsichtbare Schraubchen. Erwähnt sei noch sein bekannter „Cartesianischer Taucher“, der beweist, daß sich Descartes auch mit der Mechanik der Flüssigkeiten beschäftigt hat.

Im Gegensatz zu Descartes waren die meisten Physiker des 17. Jh., Torricelli, Pascal, Guericke, Boyle, Huygens, Hooke und Römer, begeisterte Experimentatoren.

Der Italiener EVANGELISTA TORRICELLI (1608–1647) war ein Schüler Galileis, der ihn sehr schätzte und ihn beauftragte, ein bei den Brunnenbauern von Florenz aufgetauchtes Problem zu lösen. Die Handwerker wollten wissen, warum das mit Pumpen im Rohr angesaugte Wasser niemals höher als 18 Florentiner Ellen (etwa 10 m) stieg, sondern in dieser Höhe gewissermaßen hängenblieb und über sich einen „unheimlichen freien Raum“ bildete. Galilei hatte trotz seiner großartigen mechanischen Entdeckungen keine Lösung



Feldlinien

Magnetische Feldlinien (nach Descartes)



Evangelista Torricelli



Der Luftdruckversuch von Torricelli  
(Röhre mit Skale)



Blaise Pascal

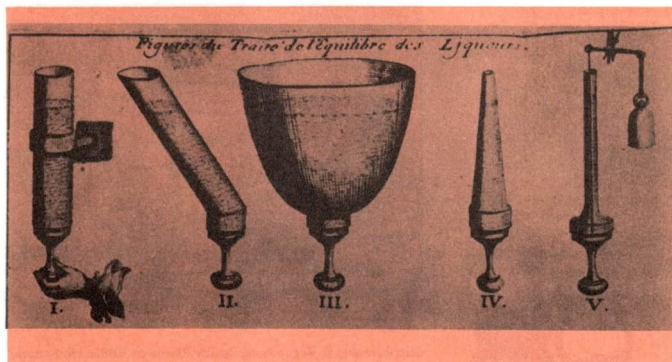
gefunden, weil er sich nicht von der antiken Vorstellung lösen konnte, daß die Natur einen unüberwindlichen Abscheu vor jedem leeren Raum, vor dem Vakuum hatte (lateinisch: „horror vacui“). „Eher ertrüge die Natur ihren Untergang als den kleinsten leeren Raum“, meinte ein Zeitgenosse, der Physiker Pascal, scherzhaft. Selbstverständlich hatte diese Auffassung ihren religiösen Hintergrund: In der Schöpfung war kein „Nichts“ denkbar.

Torricelli war ein religiöser Mensch – er schrieb später „Gedanken über die Religion“ –, doch sein Forschungsdrang war stärker. 1644 kam er auf den vortrefflichen Einfall, an Stelle von Wasser das etwa dreizehnmal schwerere Quecksilber zu verwenden; er nahm an, die Flüssigkeitssäule werde dann nur den dreizehnten Teil der Wassersäule lang sein und trotzdem das „Nichts“ über sich erzeugen. Sein Freund Viviani füllte ein Glasrohr von reichlich einem Meter Länge, an einem Ende offen und am anderen in einer Kugel endend, mit Quecksilber und drehte es um, während er die Öffnung mit einem Finger verschloß. Unter dem Quecksilberspiegel eines Gefäßes öffnete er das Rohr, indem er den Finger wegnahm. Torricelli und sein Freund irrten sich nicht. Das Quecksilber sank aus der Kugel in das Rohr zurück; bei ungefähr 1,3 Ellen – etwa 76 cm, vom Quecksilberspiegel im Gefäß an gerechnet – blieb es stehen. Torricelli wußte, daß die Luft ein Gewicht hat und auf die Unterseite der Flüssigkeitssäule ihren Druck ausübt. Aus diesem Versuch ist vier Jahre später das Quecksilber-Barometer entstanden. Wenn Torricelli auch wohl noch nichts vom Dampfdruck wußte – er hatte den horror vacui als Irrtum entlarvt und das erste technische Vakuum geschaffen. Die Brunnenbauer wußten nun Bescheid. Bei seinen Versuchen hat Torricelli auch das nach ihm benannte Prinzip der Strömungslehre gefunden.

Der vielseitige französische Philosoph und Mathematiker BLAISE PASCAL (1623–1662) veröffentlichte bereits mit 16 Jahren seine berühmte Schrift über die Kegelschnitte; er stellte geometrische Lehrsätze auf und erfand die mechanische Rechenmaschine (für Addition und Subtraktion). Pascal kannte den Versuch von Torricelli und prüfte ihn in vielen und kostspieligen Versuchen auf seine Richtigkeit. Er wollte auch wissen, was die Verdunstung verschiedener Flüssigkeiten im „Torricellischen Raum“ über der Säule bewirke, und experimentierte mit einem zwölf Meter langen Rohr aus Kristallglas. Dadurch unterschied sich Pascal von anderen Physikern, die den Torricelli-Versuch lediglich nachahmten. 1648 schickte er nämlich seinen Schwager mit dem Quecksilberrohr auf den Berg Puy de Dôme (1465 Meter). Dort konnte bewiesen werden, daß die Quecksilbersäule mit abnehmendem Luftdruck sinkt. Damit war das Barometer auf der Grundlage des Torricelli-Versuches erfunden!

Pascal bewies nicht nur die Richtigkeit dieses Versuches und fand nicht nur das Gesetz von der gleichmäßigen Druckausbreitung bei Flüssigkeiten, er stellte auch bemerkenswerte Grundsätze für das Erforschen wissenschaftlicher Wahrheit auf. So sagte er zum Beispiel, daß es für den Beweis einer Hypothese nicht genüge, wenn sich alle beobachteten Erscheinungen damit erklären lassen; wohl aber wird die Unrichtigkeit bewiesen, wenn nur eine einzige Erscheinung das Entgegengesetzte ergibt.

OTTO VON GUERICKE (1602–1686) entstammte einer Magdeburger Patrizierfamilie. Er studierte in Jena Rechtswissenschaften



und später an der damals modernsten Universität Europas, in Leiden (Holland) militärische Befestigungslehre, die auch die Fächer Mathematik, Mechanik und Bauwesen enthielt.

Als Ratsherr von Magdeburg (seit 1626) erlebte er 1631 die fast völlige Zerstörung seiner Heimatstadt durch die kaiserlichen Truppen. Guericke bewährte sich als Ratsherr und Baumeister. Er baute Magdeburg wieder auf und setzte in schwierigen Verhandlungen mit der Besatzung durch, daß die Versorgung der Bewohner gesichert wurde. Man wählte ihn daher 1646 zum Bürgermeister und schickte ihn am Ende des Krieges als Vertreter Magdeburgs zum Westfälischen Friedenskongreß nach Osnabrück. Von dort kam er mit guten Ergebnissen zurück.

In seiner knapp bemessenen Freizeit widmete sich Guericke nun wissenschaftlichen Studien und Versuchen. Seine große Geschicklichkeit und Ausdauer beim Experimentieren kam ihm dabei sehr zustatten.

Von Torricellis Versuchen wußte Guericke zunächst nichts. Sie waren nur wenigen Gelehrten bekannt geworden, und Guericke hörte von ihnen wahrscheinlich erst 1654 auf dem Regensburger Reichstag. Ihn berührte zutiefst die Frage des ungeheuren, unendlichen Welt- raumes – ob dieser von feinstem Stoff angefüllt sei oder ob es dort das umstrittene Vakuum doch gäbe.

Guericke kam auf einen großartigen Gedanken: Wenn man Wasser aus einem luftdicht geschlossenen Faß herauspumpt, müßte in diesem Gefäß die Leere, das Vakuum, übrigbleiben! Er experimentierte und erlebte Überraschungen: Die altbewährte Pumpe verlangte plötzlich so viel Kraft, daß die Verbindung zum Faß abbrach. Beim nächsten Versuch strömte die Luft durch alle Ritzen in das Holzfaß hinein. Guericke verbesserte die Pumpe und benutzte schließlich ein starkes kugelförmiges Kupfergefäß. Endlich, nach mancherlei weiteren Verbesserungen und vielen Mühen, gelang das Experiment: Guericke hatte mit Hilfe einer Luftpumpe ein Vakuum hergestellt! Bekannt ist seine Vorführung der „Magdeburger Halbkugeln“ vor

Die Pascalschen Gefäße



Otto von Guericke

Guericke versucht,  
ein Faß luftleer zu pumpen



Das Barometer von Nettel



Das Barometer von Huygens-Hoffmann

dem Reichstag zu Regensburg. Je acht Pferde an beiden Halbkugeln vermochten den Luftdruck auf die Kugel nicht zu überwinden. Wir wissen: Wirksam waren nur acht Pferde; die anderen acht lieferten lediglich die Gegenkraft.

In einem anderen Versuch wog Guericke eine gläserne Hohlkugel, pumpte sie luftleer und stellte einen Gewichtsverlust fest; die Differenz war das Gewicht der herausgepumpten Luft. Ein etwa zehn Meter langes Glasrohr an seiner Hauswand pumpte er von oben voll Wasser, so hoch wie möglich, und verschloß es dann oben; mit diesem „Wasserbarometer“ beobachtete er Schwankungen des Luftdruckes und wagte daraufhin, das Wetter vorauszusagen. Bei seinen zahlreichen Versuchen mit dem luftleeren Raum stellte er beispielsweise auch fest, daß im Vakuum Wasser hart auf die Wände aufprallt („Wasserhammer“) und der Schall sich dort nicht ausbreitet.

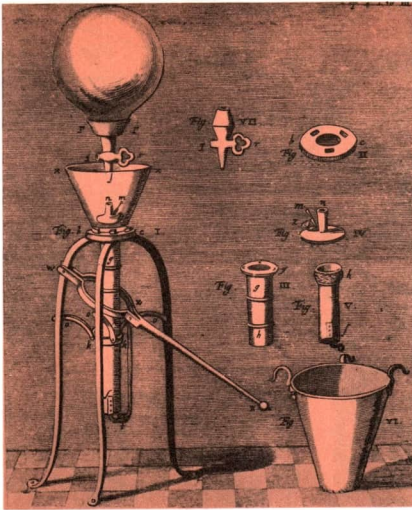
Guericke schrieb über seine bedeutenden Versuche und Erkenntnisse 1672 ein Buch: „Die neuen Magdeburger Experimente mit dem leeren Raum“. Hier sind einige Sätze daraus:

„Die Luft ist ein gewisses körperliches Etwas. – Jede Luftart ist zwar etwas Körperliches, indes sehr dünn und imstande, sich auszudehnen und auszubreiten. – Ein Abscheu vor dem leeren Raum ist in der Natur nicht vorhanden; an seine Stelle ist der Druck der umgebenden Luft zu setzen. – Außerdem hat die Luft die Eigenschaft, daß sie durch heftigen Druck mehr und mehr verdichtet und durch Gewährung eines größeren Raumes ausgedehnt werden kann. – Wie die Luft durch die Wärme ausgedehnt wird, so wird sie auch durch die größere oder geringere Abgabe von Wärme, das heißt durch Abkühlung, verdichtet und nimmt infolgedessen weniger Raum ein.“

Die Erkenntnis des letzten Zitates benutzte Guericke als Grundgedanken zum Bau eines Thermometers. Er schrieb noch vieles Richtige über die Luft und ihre Bestandteile, über Luft und Erde, Luft und Kosmos. Diese geistigen Leistungen können wir erst richtig würdigen, wenn wir bedenken, daß das Wesen der Luft den Menschen der damaligen Zeit noch völlig fremd war!

Das erstarkende Bürgertum lehnte bloße Gedankenspekulationen





Guerickes zweite Luftpumpe (1663)

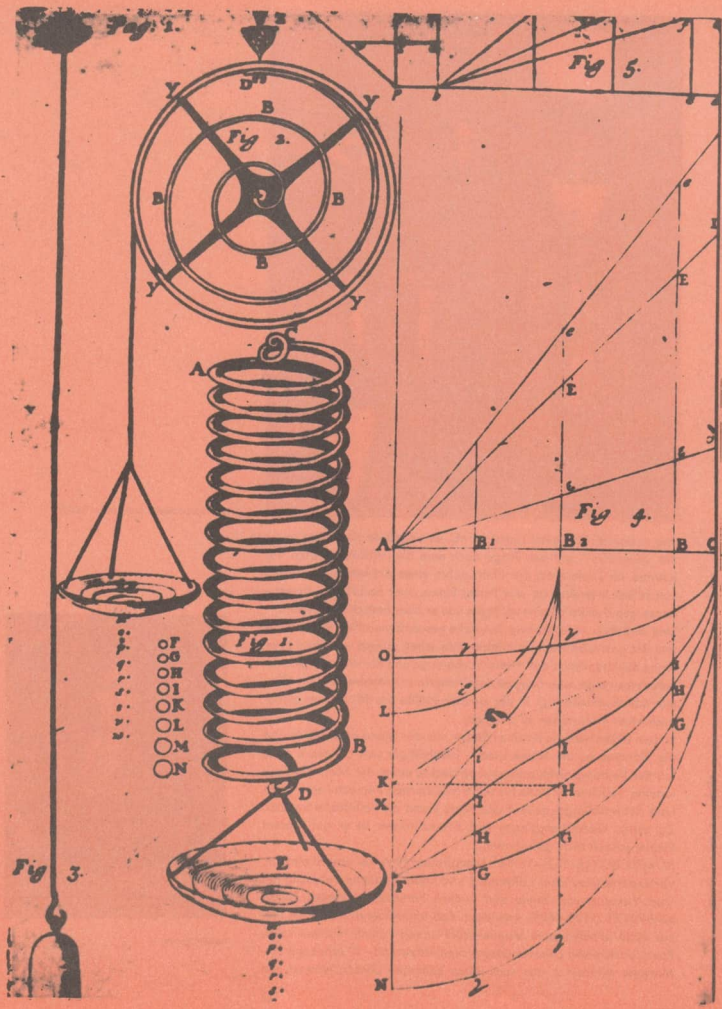
und erstarrte Buchgelehrsamkeit ab, es begnügte sich nicht mehr mit „Begriffen“, mit der Frage nach dem begrifflichen Wesen des Raumes im Sinne etwa der Philosophie eines Aristoteles. Es wollte nun selber begreifen im wörtlichen Sinne, über handfestes, beweisbares, gesichertes Wissen verfügen und es ökonomisch auswerten. Und wahrlich – mit der von Guericke geschaffenen Physik der Gase und des gasfreien Raumes konnte man schon einiges schaffen! Hier lagen die Ursprünge der Wettervorhersage und die Wurzeln ganzer Industriezweige, zum Beispiel des Dampfmaschinenbaues. Der Chemie half Guericke, sich in der zweiten Hälfte des 18. Jh. von alchemistischen Vorurteilen zu befreien.

In dem Bestreben, die Kraft zu finden, die den Mond an die Erde und die Planeten an die Sonne bindet, beschäftigte sich Guericke auch mit der Reibungselektrizität und entdeckte dabei die Abstoßung geladener Teilchen. Er hatte für seine elektrischen Versuche eine drehbare Schwefelkugel gebaut und seine Hand als Reibfläche benutzt. Zu neuen Gedankengängen und Erkenntnissen ist er auf diesem Gebiet jedoch nicht gekommen.

ROBERT BOYLE (1627–1691), ein englischer Physiker und Chemiker, verbesserte Guericke's Luftpumpe und nahm ähnliche Versuche mit dem Vakuum vor. Boyle und andere Forscher, darunter EDMOND MARIOTTE (1620–1684), bewiesen, daß im luftleeren Raum ein Heber nicht arbeitet, eine Magnetnadel unbeirrt nach Norden zeigt, Feuer erlischt und Lebewesen ersticken. Boyle und – 17 Jahre später – Mariotte entdeckten das nach ihnen benannte Gesetz, wonach bei



Robert Boyle





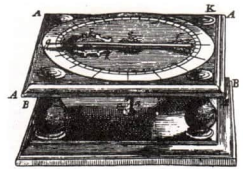
idealen Gasen das Produkt aus Druck und Volumen bei konstanter Temperatur unverändert bleibt. („Ideal“ nennt man ein Gas, bei dem die Kräfte zwischen den Molekülen und deren Eigenvolumen vernachlässigt werden können.)

Diese Erkenntnis war eine der Voraussetzungen für die Entwicklung der Dampfmaschine. Sie führte über die vielen Versuche Thomas Saverys und Denis Papins in der zweiten Hälfte des 17. Jh. zur ersten brauchbaren atmosphärischen Kolben-Dampfmaschine (1711) von Thomas Newcomen, zur ersten Industrie-Dampfmaschine mit Drehbewegung und Schwungrad (1784) von James Watt. Rund zweihundert Jahre dauerte dieser erste Entwicklungsabschnitt, obwohl solche Kraftmaschinen zur Wasserhaltung zum Beispiel im Steinkohlenbergbau dringend benötigt wurden.

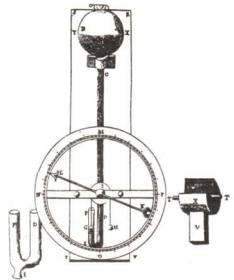
ROBERT HOOKE (1635–1703), ein englischer Naturforscher, wurde vor allem durch das nach ihm benannte Gesetz bekannt, das die Grundlage der Elastizitätstheorie bildet: In einem elastischen Körper ist in einem bestimmten Bereich die Ausdehnung der angewandten Kraft verhältnismäßig.

Hooke arbeitete eine Zeitlang als Assistent bei Boyle und unterstützte ihn beim Bau der Luftpumpe. Obwohl er fast immer krank war, machte er eine Erfindung nach der anderen; so schnell, daß er meist gar nicht dazu kam, sie rechtzeitig zu veröffentlichen und sich so das Urheberrecht zu sichern.

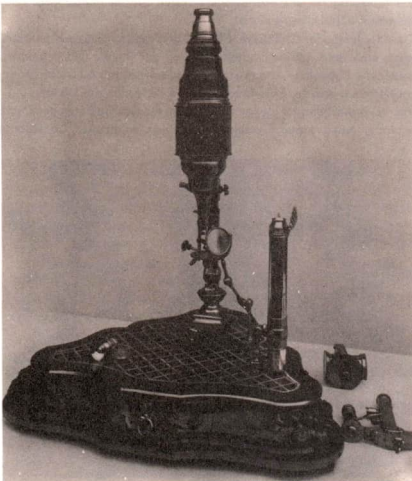
Die Wetterkunde (Meteorologie) entwickelte Hooke zu einer Wissenschaft. Er erfand den Windmesser (Anemometer), den Feuchtigkeitsmesser (Hygrometer), mit einer Granne des wilden Hafers als



Hookes Hygrometer mit der Granne des wilden Hafers



Hooke baute aus Guericks Barometer das Radbarometer

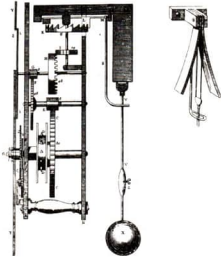


Weitere Mikroskope aus dieser Zeit

Seite 44: Hookes Wendel



Christian Huygens



Die Pendeluhr von Huygens

So zeichnete Huygens den Mechanismus seiner Uhr

hygroskopischem Körper, sowie ein Quecksilberbarometer, das die Höhe der Säule durch einen Zeiger auf einer runden Skale anzeigte („Radbarometer“); sogar schreibende Meßgeräte baute er zu diesem Zweck. Die Wetterlage erklärte er richtig als Auswirkung physikalischer Einflüsse auf die Erdatmosphäre.

Er konstruierte ferner eine Fallmaschine, um Galileis Fallgesetze damit experimentell zu kontrollieren. Auch zum Prüfen der Gasgesetze baute er ein Gerät, das noch lange Zeit im Unterricht benutzt worden ist; bestimmte Luftmengen wurden in einem Glasrohr durch Quecksilber zusammengepreßt.

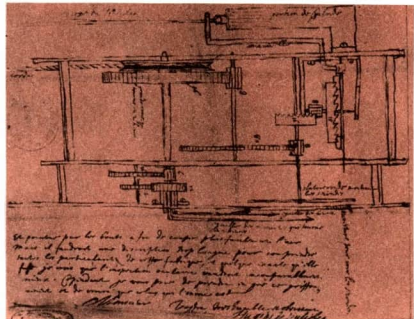
Besonders bemerkenswert sind die Leistungen Hookees in der Optik. Er schuf die ersten neuzeitlichen astronomischen Geräte und ein zusammengesetztes Mikroskop mit einem Beleuchtungssystem aus einem Öllämpchen und einer mit Salzwasser gefüllten „Schusterkugel“ (Glaskugel). Mit diesem einfachen Gerät hat Hooke bewundernswerte Beobachtungen der organischen und anorganischen Welt gemacht und sie aufgezeichnet. Er veröffentlichte sie in seinem Buch „Micrographia“. Die benötigten Linsen stellte er selber her und teilte Huygens dabei gewonnene Erfahrungen mit.

Als Geologe hat sich Hooke ebenfalls einen Namen gemacht; er gilt als einer der Begründer dieser Wissenschaft. In der Astronomie erklärte er, daß die Gravitation die Himmelskörper auf ihren gekrümmten Bahnen bewege und diese Anziehungskraft mit dem Quadrat der Entfernung abnehme.

Wie Leonardo da Vinci hat Hooke vieles einer späteren Zeit vorweggenommen und konnte daher nicht mehr selbst die volle Anerkennung seiner Leistungen erleben. Heute wissen wir, daß Hooke einer der tatkräftigsten und erfindungsreichsten Geister mit außerordentlichem Weitblick gewesen ist.

Der Niederländer CHRISTIAN HUYGENS (1629–1695) widmete sich nach mehreren geometrischen Arbeiten der Physik und erfand als erster die Pendeluhr, die durch ein Räderwerk mit Gewichtstücken angetrieben wurde. Er erfand auch die Federuhr mit Unruh.

Am bekanntesten sind Huygens' Arbeiten auf den Gebieten der Optik und der Astronomie. Gemeinsam mit seinem Bruder Constantijn





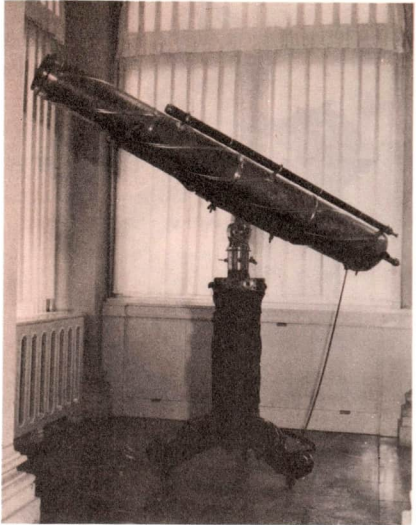
Astronomisch-geografische Uhr

stellte er seine ausgezeichneten optischen Linsen vom Guß bis zum Schliff selber her, ebenso die dazu nötigen Schleifmaschinen. Da es Schwierigkeiten bereitete, für sehr große Linsen das passende Rohr (den Tubus) zu schaffen, baute er als erster ein Fernrohr ohne Tubus, sozusagen ein Freiluft-Fernrohr – sogar mit einem Mikrometer im Okular, um die Durchmesser der Gestirne messen zu können.

Huygens hat mit seinen Fernrohren vieles beobachtet und ausgewertet. Zum Verständnis der Himmelsmechanik steuerte er einen wesentlichen Gedanken bei: die mathematische Darstellung der Fliehkraft. Der Forscher entwickelte ferner die Theorie des Stoßes elastischer Körper und entdeckte das Gesetz von der Erhaltung der „lebendigen Kraft“ in solchen Stößen. Er baute ein Planetarium mit Antrieb durch eine Kurbel, fertigte ein doppeltes Heberbarometer an, verbesserte die Luftpumpe und das Thermometer. Seine



Huygens führte die Uhr-Unruh ein



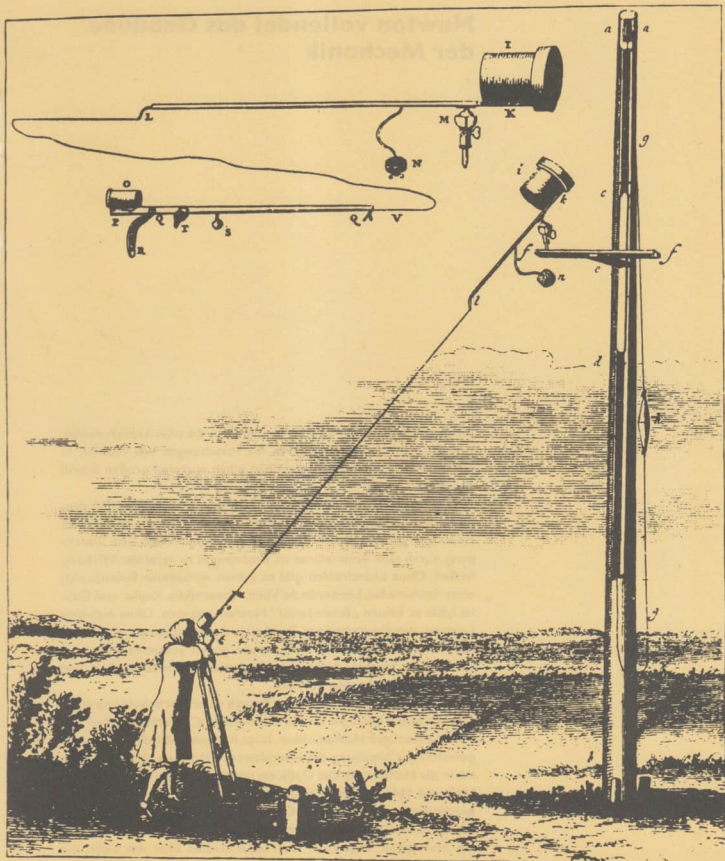
Spiegel-Fernrohr von Löser (1742)

Luftpumpe war der von Boyle ähnlich, jedoch kräftiger gebaut und enthielt einen Teller, auf den ein flaschenförmiger Rezipient (Behälter) aufgekittet wurde.

Huygens hatte den Ehrgeiz, eine Wasserpumpe zu konstruieren, mit der man hohe Fontänen erzeugen konnte. Er hatte nämlich erfahren, daß Ludwig XIV. von Frankreich solche Wasserkünste in seinem Schloßpark haben wollte. Die bisherigen Pumpen schafften das nicht, und Huygens kam auf den verwegenen Plan, den Kolben mit Schießpulver im Zylinder zu heben! Der äußere Luftdruck würde dann den Kolben wieder zurückdrücken, meinte Huygens und vergaß dabei die Pulvergase unter dem gehobenen Kolben. Ein Pfund Pulver müsse einen Kolben von 3000 Pfund Gewicht 30 Fuß hoch heben, rechnete er sich aus.

Die französische Akademie der Wissenschaften war von dem Plan begeistert. Papin, der die Pumpe bauen sollte, war es bald viel weniger; es gelang ihm nicht, ein arbeitsfähiges Modell dieser „Pulverpumpe“ zu erhalten. Verwirklichen konnten die beiden das Projekt also nicht, aber sie hätten beinahe den ersten Verbrennungsmotor gebaut!

Im Alter von mehr als sechzig Jahren schrieb Huygens sein bedeutendstes Werk, die Abhandlungen über das Licht. Es ist Anfang und Grundlage der Wellenoptik, die bald Gegenstand scharfer Angriffe wurde, auch durch Newton. Erst Fresnel erkannte 1815 – ein Jahrhundert später! – die Berechtigung der Wellentheorie des Lichtes.





# Newton vollendet das Gebäude der Mechanik

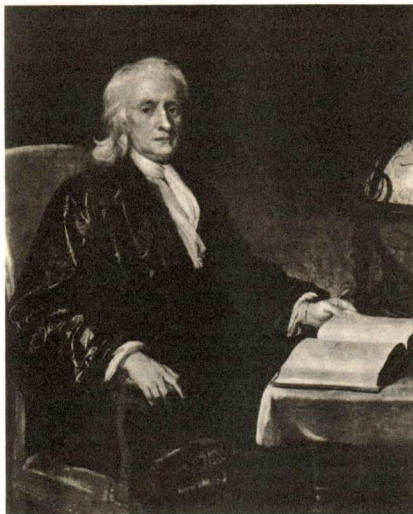
An der Wende des 17. zum 18. Jh. machten die physikalisch-mathematischen Wissenschaften durch die Forschungen von Newton in England und Leibniz in Deutschland einen weiteren großen Schritt vorwärts.

Es scheint, als vereinigten sich die bisherigen großen Entwicklungslinien der Naturforschung in der Leistung ISAAC NEWTONS (1643–1727) – so wie sich parallele Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch eine Sammellinse im Brennpunkt zu vereinter Wirkung treffen. Ohne Lichtstrahlen gibt es keinen wirksamen Brennpunkt; ohne Archimedes, Leonardo da Vinci, Kopernikus, Kepler und Galilei hätte es keinen „Brennpunkt“ Newton gegeben. Ohne Newtons Leistung, der die vorherigen Ergebnisse der Forschung in einfachen, mathematisch exakten Grundgesetzen genial zusammenfaßte und anwendbar machte, hätten die moderne Naturwissenschaft und Technik nicht entstehen können.

Isaac Newton studierte nach dem Besuch einer Dorfschule und einer Lateinschule Theologie an der Universität Cambridge. Einer der besten damaligen Mathematiker, Isaac Barrow, entdeckte die außergewöhnliche Begabung des einundzwanzigjährigen Newton, führte ihn in die Mathematik und Optik ein und förderte ihn auf jede Weise. 1665 und 1666 wütete in England die Pest; die Universität wurde geschlossen, und Newton hielt sich während dieser beiden Jahre in seinem Heimatdorf Woolsthorpe auf.

Ein Jahr später begann er hier seine Studien über das Licht, die Schwerkraft und die Infinitesimalrechnung. 1668 baute er das erste Spiegelteleskop; 1672 beobachtete er Farberscheinungen in der Nähe des Brennpunktes einer Sammellinse. Er untersuchte diese Erscheinungen näher und fand bald, daß er sie am deutlichsten hervorrufen konnte, wenn er einen Sonnenstrahl, der durch ein Loch im Fensterladen kam, durch ein Glasprisma schickte.

Newton entdeckte, daß das – bisher für einheitlich gehaltene –



Isaac Newton

„weiße“ Licht aus verschiedenfarbigen Teilen (Strahlen) besteht, die im Prisma unterschiedlich stark gebrochen werden, und zwar blau und violett mehr als rot. Er bewies im Experiment, daß ein einfarbiger Strahl nicht weiter zerlegbar ist. Die Farbe eines Körpers erklärte Newton dadurch, daß dieser Körper die zu der Farbe gehörende Strahlenart besonders zurückwirft.

Die erst 1660 gegründete englische Royal Society (Königliche Gesellschaft, etwa einer Akademie der Wissenschaften zu vergleichen) nahm starken Anteil an Newtons Arbeiten. Auf ihren Wunsch legte er, jetzt 29 Jahre alt, seine erste Veröffentlichung über die Brechung des Lichtes vor; „Licht besteht aus ungleichmäßig brechbaren Strahlen“, schrieb er darin.

1675 gab er eine zweite Abhandlung über das Licht heraus, in der er die Ansicht vertrat, das Licht bestehe aus Korpuskeln, kleinen Teilchen. Damit konnte er jedoch die Farben sehr dünner Schichten und die bekannten Farbenringe nicht erklären; er erweiterte seine Lichttheorie, indem er den Korpuskeln gewisse Welleneigenschaften zuschrieb. Im Zusammenhang damit hat er eine Größe gemessen, die wir heute Wellenlänge nennen. Mit dieser klugen Mischung von Korpuskel- und Welleneigenschaften hat Newton die heute gültige Theorie von der Doppelnatur (dem Dualismus) des Lichtes gefunden. Das war eine außerordentliche Leistung. Alle seine Entdeckungen auf optischem Gebiet faßte er in dem großen Werk „Opticks“ zusammen; er veröffentlichte es allerdings erst 1704. Offensichtlich wollte er damit die Herausgabe zu Lebzeiten Hooke's, der 1703

starb, vermeiden. Newton, von Natur bescheiden, mochte keine Streitereien, weil sie ihn in seiner Arbeit störten. Sie ließen sich jedoch nicht immer vermeiden, weil er manches Alte umwarf und durch kühne neue Erkenntnisse ersetzte. Die Anhänger des Alten aber, darunter auch Hooke, wehrten sich oder behaupteten, das Neue schon früher gefunden zu haben. So entstand auch der ebenso unerfreuliche wie überflüssige Streit mit Leibniz wegen des Anspruchs, die Infinitesimalrechnung als erster gefunden zu haben. Dabei hatten beide recht, denn jeder war selbständig daraufgekommen. Mit 27 Jahren war Newton als Nachfolger Barrows Professor der Mathematik geworden. Wöchentlich eine Vorlesung und zwei vierstündige Übungen ließen ihm viel Zeit für seine Experimente. 1701 legte er sein Lehramt nieder. Von 1703 bis zu seinem Tode 1727 war er Präsident der Royal Society.

Newtons größte wissenschaftliche Leistung, mit der die Naturforschung einen riesigen Schritt vorwärtsgebracht und Grundlage für die weitere Forschung wurde, lag auf dem Gebiete der Mechanik; sie veränderte das Antlitz der Wissenschaft. Erst Max Planck mit seiner Quantentheorie und Albert Einstein mit seiner Relativitätstheorie brachten grundsätzlich neue Gedanken auf diesem Gebiet und leiteten damit das Zeitalter der modernen Physik ein. Die „Newtonsche Mechanik“ wurde zu einem festen Begriff.

Mit 23 Jahren entdeckte Newton die Kraft, die den Himmelskörpern ihre Bahn vorschreibt, die Ebbe und Flut bewirkt und den Stein auf die Erde fallen läßt: die Schwerkraft, die Gravitation (lateinisch gravis = schwer). Er erkannte, daß alle Massen sich gegenseitig anziehen.

Die Legende berichtet, Newton habe, auf einer Wiese ruhend, einen fallenden Apfel beobachtet und sei dadurch zum Nachdenken angeregt worden: Warum fällt der Apfel zur Erde? Zieht nur die Erde den Apfel an, oder hat auch dieser, vielleicht gar jeder Körper eine solche Anziehungskraft? Wirft man den Apfel waagerecht, so fällt er sicherlich wieder auf die Erde. Kann er die Erde umkreisen, ohne herabzufallen, wenn er nur schnell genug fliegt?

Newton ordnete die zahlreichen Beobachtungen von Kopernikus, Brahe, Galilei und Kepler und führte alles auf einfache Gesetze zurück. 1687 veröffentlichte er sie in seinem Werk „Philosophiae naturalis principia mathematica“ (Mathematische Grundsätze der Naturphilosophie), einem der bedeutendsten Physikbücher, die je erschienen sind. Die hier dargelegten Grundlagen und Wege zur Erkenntnis sind noch heute gültig. Ohne jede Verschleierung, ohne einen mystischen Einschlag bewies Newton überzeugend, daß man alle physikalischen Erscheinungen in mathematischer Form aus seinen Grundsätzen ableiten kann – von der einfachen Pendelbewegung bis zu den Bewegungen der Planeten.

Im ersten Band kann man die bekannten drei Bewegungsgesetze nachlesen: 1. Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, wenn nicht eine von außen einwirkende Kraft diesen Zustand ändert. 2. Die Änderung der Bewegung ist in Größe und Richtung der einwirkenden Kraft verhältnismäßig (proportional). 3. Die Wirkung ist gleich der Gegenwirkung.

Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung und anderes leitete Newton aus diesem Naturgesetz ab: Jede Masse zieht eine andere

Masse mit einer Kraft an, die verhältnismäßig dem Produkt dieser Massen und umgekehrt verhältnismäßig dem Quadrat ihrer Entfernungen ist.

Im zweiten Band behandelt Newton die Bewegung von Flüssigkeiten und die Wellenbewegung. Im dritten Band berechnet er unter vielem anderen die Masse der Sonne und der Planeten, die Bewegung der Erdoberfläche, die Abplattung der Erde; er gibt eine Theorie von Ebbe und Flut und eine andere zum Berechnen von Kometenbahnen. Newton sagt dann: „Ich habe nicht dahin gelangen können, aus den Erscheinungen die Ursache dieser Eigenschaften der Schwerkraft abzuleiten, und Hypothesen erdenke ich nicht. Alles nämlich, was nicht aus den Erscheinungen selbst folgt, ist eine Hypothese; und Hypothesen, seien sie nun metaphysische oder physische, mechanische oder diejenigen der verborgenen Eigenschaften, dürfen nicht in die Experimentalphysik aufgenommen werden.“

Diese Weigerung, Hypothesen aufzustellen, bezog sich jedoch nur auf die Ursache der Schwerkraft; an anderen Stellen hat Newton, der eine sehr schöpferische Phantasie besaß, durchaus Hypothesen aufgestellt, aber streng darauf geachtet, daß sie als solche von den Ergebnissen seiner Experimentallehre deutlich zu unterscheiden sind. In „Opticks“ trennte er beide Verfahren der Erkenntnisgewinnung scharf in zwei Abschnitte: den experimentellen Teil – in Galileis Art – und den hypothetischen (spekulativen) – in der Arbeitsweise von Descartes –, als Fragen an den Schluß gesetzt.

Newtons „absoluten Raum“ und „absolute Zeit“ hat Einstein inzwischen als nicht allgemeingültig nachgewiesen; sie bleiben jedoch Grundlage unserer Alltagserfahrungen, das heißt, sie sind gültig im Bereich der im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit kleinen Geschwindigkeiten, mit denen wir es auf der Erde zu tun haben.

Einstein schrieb darüber in seinen „Autobiographischen Bemerkungen“: „Newton, verzeih mir; du fandest den einzigen Weg, der zu deiner Zeit für einen Menschen von höchster Denk- und Gestaltungskraft eben noch möglich war. Die Begriffe, die du schufst, sind auch jetzt noch führend in unserem physikalischen Denken, obwohl wir nun wissen, daß sie durch andere, der unmittelbaren Erfahrungen fernstehende ersetzt werden müssen, wenn wir ein tieferes Begreifen der Zusammenhänge anstreben.“

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ (1646–1716) war ein ungemein vielseitiger deutscher Gelehrter; er hat auf zahlreichen Gebieten neue Erkenntnisse gefunden, vor allem in der Philosophie, Mathematik, Naturwissenschaft, Staats- und Rechtslehre, Geschichts- und Sprachwissenschaft. Er ist wohl der letzte gewesen, der noch alle Ergebnisse menschlicher Forschung überblicken konnte. Im Jahre 1700 gründete er die Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin (heute Deutsche Akademie der Wissenschaften).

Daß Leibniz – ebenso wie kurz vorher Newton – seine eigene Infinitesimalrechnung aufstellte, wurde schon erwähnt; sie veröffentlichte sie 1684. Die von Pascal erdachte Rechenmaschine zum Addieren und Subtrahieren verbesserte und erweiterte er, so daß man damit auch multiplizieren und dividieren konnte. 1673 wurde er Mitglied der Royal Society in London.

In der Physik schuf Leibniz die Begriffe „lebendige Kraft“ =  $m \cdot v^2$  (Masse mal dem Quadrat der Beschleunigung; das ist das Doppelte der heutigen Bewegungsenergie) und „tote Kraft“ (Druck eines



Gottfried Wilhelm Leibniz

ruhenden schweren Körpers; das ist die heutige Lageenergie). Er baute das Aneroid-Barometer und erzeugte mit Guericks Elektrisiermaschine als erster elektrische Funkenentladungen; dabei stellte er fest, daß die Funken heiß waren und kleine Verbrennungen hervorrufen konnten.

Leibniz erkannte die zentrale Bedeutung der Physik in der Naturwissenschaft; allerdings ging er dabei etwas zu weit, wenn er sagte: „Die Nachwelt wird ihre ernsthaften Überlegungen einzig der Physik zuzuwenden haben“. Der Gelehrte wollte auch die Einheit der Wissenschaft durch die Gründung internationaler Akademien verwirklichen, in denen die Wissenschaftler aller Länder zum Wohle der Menschheit gemeinsam wirken sollten.



# Die Lehre von der Wärme

Wenn wir bei unserem Vergleich der Physikgeschichte mit einem immer größer werdenden Fluß und Strom bleiben, müssen wir bedenken: Ein Strom führt zuerst meist mehrere Teilströme nebeneinander, die sich zunächst nur wenig vermischen oder gar nicht. Erst später führt der Strom sozusagen ein großes, einheitliches Wasser, dem man nicht mehr ansieht, daß es viele ursprünglich selbständige Flüsse enthält. Für unsere Betrachtungen bedeutet das: Zu den eindrucksvollen Entwicklungen der Mechanik gesellen sich weitere, vor allem die der Optik, der Wärmelehre und der Elektrizität mit dem Magnetismus.

Von der Optik haben wir schon allerlei Wissenswertes gehört. Wir wollen nun einiges von dem betrachten, was Forscher auf dem Gebiet der Wärmelehre gedacht und getan haben. Es mutet seltsam an – aber jahrtausendlang ist offenbar kein Forscher auf den Gedanken gekommen, die merkwürdige Erscheinung „Feuer“ einmal genau zu untersuchen und sich über Herkunft und Eigenschaften Gedanken zu machen. Erst Francis Bacon hat 1620 die Wärme als Bewegung kleinster Teilchen gedeutet und ist damit gleich zu der heute noch gültigen Meinung gekommen.

## Vom Werden des Thermometers

Näher als theoretische Überlegungen lag das praktische Bedürfnis, mit Meßgeräten zunächst einmal Unterschiede in der Temperatur (im Wärmestand) nachzuweisen; der menschliche Gefühlssinn genügt nicht. Mit dieser Frage haben sich vermutlich als erste Philon und Heron beschäftigt. Beide nutzten die Erfahrung, daß sich das Volumen der Luft mit der Temperatur ändert, beide verwendeten Hohlgefäße für ihre Versuche. Philon nahm eine hohle Bleikugel,

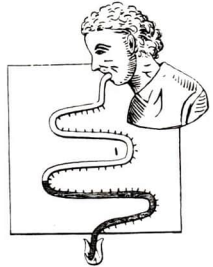


die mit der sie umgebenden Luft durch ein Glasrohr verbunden war. Dieses Glasrohr, zweimal rechtwinklig gebogen, tauchte außen in ein offenes Gefäß mit Wasser. Bei steigender Temperatur entwich etwas Luft aus der Hohlkugel und stieg in Form von Luftblasen im Wasser auf. Bei sinkender Temperatur zog sich die Luft in der Kugel zusammen, und es entstand ein Unterdruck; sofort drückte die Außenluft eine entsprechende Menge Wasser in die Kugel, bis wieder Gleichgewicht herrschte. Leider war auf diese Weise die Kugel bald mit Wasser gefüllt.

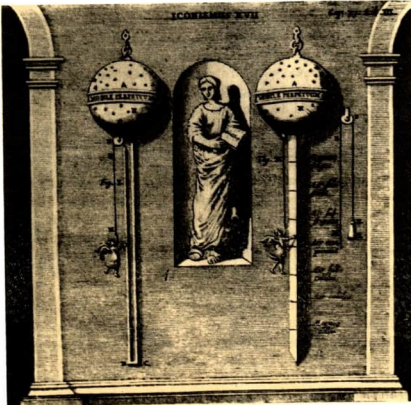
Mit solchen Geräten konnte man nur jeweils zwei Temperaturen miteinander vergleichen. Da man mit ihnen noch nicht messen, sondern nur einfach beobachten konnte, nannte man sie Thermoskope (griechisch *thermós* = warm, und *skopéin* = betrachten, beobachten). Sie werden – in moderner Form des Doppel-Thermoskopes – noch heute zum Vergleichen verwendet.

Einen großen Vorzug hat solch ein einfaches Luft-Thermoskop (Gas-Thermoskop): Die Luft verändert sich ganz gleichmäßig mit der Temperatur. Einige Flüssigkeiten, zum Beispiel Wasser, Quecksilber und Alkohol, reagieren nicht so genau. Wasser hat sogar bei  $+4^{\circ}\text{C}$  sein kleinstes Volumen (und seine größte Dichte), es ist also für Temperaturen unterhalb dieses Wertes überhaupt nicht zu gebrauchen.

Bald verstärkte sich das Bedürfnis, die Temperatur in Einheiten zu messen. Die Naturforscher wollten ihre Beobachtungen von Wärmerscheinungen genauer aufschreiben, und schließlich wollte man ganz allgemein sagen können, wie warm zum Beispiel die Luft oder das Wasser sei. So ist es nicht verwunderlich, daß mehrere Forscher Thermometer (Wärmestandsmesser) bauten und ihre Skalen nach naheliegenden „festen Punkten“ (Festpunkten, Fixpunkten) eichten. Guericke hatte eine kupferne Hohlkugel mit einem langen U-förmig gebogenen kupfernen Rohr verbunden, das bis zur Hälfte mit Alkohol

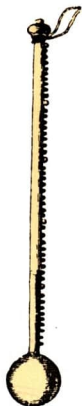


Das verlängerte Thermometer von Santorius diente medizinischen Zwecken



Guericks Thermometer an seinem Hause

Seite 56: Luft-Thermoskop, Galilei  
zugeschrieben



Thermometer von Rey



Thermometer von Löser (1760)

gefüllt war. Im Alkohol, der sich im freien Schenkel des Rohres befand, schwamm ein kleiner länglicher Hohlkörper aus dünnem Messingblech; einige Schrotkugeln sorgten dafür, daß sich der Schwimmer senkrecht und gerade eben an der Oberfläche der Flüssigkeit hielt. Vom Schwimmer aus lief ein dünner Faden über ein Rädchen außerhalb des Rohres und trug am freien Ende draußen eine kleine menschliche Figur; sie zeigte mit einer Hand auf eine Skale. Damit war aus einem Thermoskop das Meßgerät Thermometer geworden.

Fixpunkte benutzte Guericke noch nicht. Seine Thermometerskale zeigte – von oben nach unten – die recht willkürlich gewählten sieben Teile: sehr kalt, kalt, mäßig kalt, ausgeglichen (temperiert), mäßig warm, warm, sehr warm. Diese grobe Skale war für physikalische Messungen der Lufttemperatur noch nicht geeignet, doch war man wieder einen Schritt vorangekommen.

Die Akademie in Florenz widmete dieser Entwicklung große Aufmerksamkeit. 1641 gab es dort schon ein oben geschlossenes Thermometer mit Alkohol als Ausdehnungsflüssigkeit. Auch Quecksilberthermometer stellte man dort in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts her; da sich jedoch Alkohol viel stärker als Quecksilber ausdehnt, zog man ihn für die Thermometer vor. Forscher an der Akademie in Rom bevorzugten um 1640 Quecksilber; vermutlich verdünnten sie die Luft am oberen Ende. Äußerlich ähnelte das Instrument bereits dem heutigen. Die Skale, durch kleine Glasperlen dargestellt, war 50-, 60-, 70- und 100fach unterteilt. Als Nullpunkt hatte man wahrscheinlich die größte Winterkälte und als Höchstpunkt die größte Sommerhitze in Florenz gewählt. Die sehr relativen und unklaren Begriffe Kälte und Wärme waren nicht getrennt.

Nun folgten erste Versuche, die Skale für objektive Messungen mit Hilfe von Festpunkten brauchbar zu machen. Einen großen Fortschritt erzielte der Physiker GABRIEL DANIEL FAHRENHEIT (1686–1736). Er baute seine Thermometer in der noch heute üblichen Form und füllte einige mit Quecksilber, andere mit Alkohol. Als Tiefstpunkt ( $0^\circ\text{Fahrenheit}$ ) nahm er die Temperatur einer Kältemischung aus Eis, festem Salmiak und Wasser; das sind  $-17,777\dots^\circ\text{C}$ . Als zweiten Festpunkt wählte Fahrenheit den Gefrierpunkt des Wassers und teilte den Bereich von  $0^\circ\text{F}$  bis hier in 32 Teile ( $0^\circ\text{C} = 32^\circ\text{F}$ ). Für den Siedepunkt des Wassers ergaben sich  $212^\circ\text{F}$  nach der einfachen Beziehung zwischen der Fahrenheit- und der Celsius-Skale:

$$^\circ\text{F} = \frac{9}{5}^\circ\text{C} + 32; \quad ^\circ\text{C} = \frac{5}{9}^\circ\text{F} - \frac{5}{9} \cdot 32$$

In den englischsprachigen Ländern ist die Fahrenheitskale noch heute üblich. Fahrenheit entdeckte übrigens bei seinen Thermometerversuchen die Erscheinung des unterkühlten Wassers; unter bestimmten Voraussetzungen kann man Wasser (und andere Flüssigkeiten) unter den Gefrierpunkt abkühlen, ohne daß es zu Eis erstarrt. Bringt man dann ein winziges Teilchen in das unterkühlte Wasser oder erschüttert es, so erstarrt es ganz plötzlich.

OLE RÖMER (1644–1710), ein dänischer Astronom, der als erster die Lichtgeschwindigkeit auf geniale Weise an der Bewegung der Jupitermonde gemessen hat, benutzte nach 1703 ein Quecksilberthermometer mit den Festpunkten schmelzender Schnee und siedendes Wasser. Unterschiede in der Lufttemperatur veränderten die Einstellung seines Fernrohres und seines Pendels; Römer beseitigte

diese Fehler mit Hilfe seines Thermometers. Es ist möglich, daß Fahrenheit hier die Anregung zu seinen eigenen Versuchen empfangen hat; er war 1708 und 1709 bei Römer zu Besuch.

Der französische Physiker und Zoologe RENÉ-ANTOINE FERCHAULD DE RÉAUMUR (1683–1757) teilte den Bereich zwischen Gefrierpunkt und Siedepunkt des Wassers in 80°R auf; auch diese Skale ist heute noch in einigen Ländern üblich (20°R = 25°C).

Die 100teilige Skale bei Quecksilber-Thermometern führte der schwedische Astronom und Physiker ANDERS CELSIUS (1701–1744) ein. Sie war bald in den meisten Ländern verbreitet und wurde als zweckmäßigste (weil dekadische) Thermometerskale in der Forschung anerkannt. Daß Celsius ebenfalls Gefrier- und Siedepunkt des Wassers als Festpunkte benutzte, ist bekannt. Er hat allerdings zunächst 0°C als Siedepunkt und 100°C als Gefrierpunkt des Wassers angegeben. Sein Nachfolger Strömer kehrte die Skale später um. Celsius wußte auch, daß der Siedepunkt von Flüssigkeiten vom Luftdruck abhängig ist.

Wir sagen heute: 0°C entspricht einer Temperatur von 273,15°K (Kelvin), so benannt nach dem englischen Physiker WILLIAM THOMSON, dem späteren Lord Kelvin (1824–1907). Die („absolute thermodynamische“) Kelvinskale wurde erst später aufgestellt. Kühlt man ein ideales Gas bei gleichbleibendem Volumen ab, so sinkt der

Druck des Gases mit jedem Grad um  $\frac{1}{273,15}$  des Druckes beim Ge-

frierpunkt des Wassers, also bei 0°C. Das ist das für die Thermodynamik so wichtige Gesetz, das der französische Physiker LOUIS-JOSEPH GAY-LUSSAC (1778–1850) fast ein Jahrhundert nach dem Gesetz von Boyle und Mariotte entdeckte: Der Druck jedes Gases nimmt bei gleichbleibendem Volumen für jeden Grad Celsius Temperaturerhöhung um  $\frac{1}{273,15}$  seines ursprünglichen Wertes zu.

Theoretisch wird daher der Gasdruck gleich Null bei –273,15K; das ist der absolute Nullpunkt. Die absolute Temperatur  $T$  (in K) ist gleich der Temperatur  $t$  (in °C) plus 273,15°C;

$$T = (t + 273,15)^\circ\text{C}$$

Demnach gilt: 100°C = 373,15K.

Ein ideales Gas ohne Anziehungskräfte zwischen unendlich kleinen Molekülen müßte im absoluten Nullpunkt zu einem mathematischen Punkt (der bekanntlich keine Ausdehnung hat) zusammenschrumpfen. Das ist nur eine Theorie, aber eine sehr brauchbare; übrigens werden die genannten Voraussetzungen bei Edelgasen (Helium, Argon, Neon und so weiter) weitestgehend erreicht. Mit ihnen ist die Forschung heute bereits sehr dicht an den absoluten Nullpunkt herangekommen, um das Verhalten von Körpern bei tiefsten Temperaturen zu prüfen. Dieses Problem spielt bei der gegenwärtigen Erforschung der elektrischen Supraleitfähigkeit eine immer größere Rolle.

Auf den Gedanken eines absoluten Nullpunktes kam als erster der französische Physiker GUILLAUME AMONTONS (1663–1705), der sich mit Fragen des Barometers und Thermometers befaßte. Im Jahre 1695 entdeckte er, „daß ungleiche Mengen Luft, unter gleichem Druck stehend, ihre Spannkraft um den gleichen Wert vermehren, wenn die Temperatur um die gleiche Anzahl von Graden erhöht wird . . . , so daß es scheint, daß die äußerste Kälte dieses Thermome-



Thermometer von Fahrenheit



Thermometer von Réaumur



ters diejenige wäre, bei der die Luft keine Spannkraft mehr ausüben könnte, also ein viel beträchtlicherer Kältegrad als der ist, den man sehr kalt nennt."

Damit hatte Amontons schon das Grundsätzliche des Gesetzes von Gay-Lussac gefunden und den absoluten Nullpunkt erläutert; er hatte außerdem den Siedepunkt des Wassers als zweiten Festpunkt des Thermometers vorgeschlagen. Das Gesetz von Gay-Lussac ist übrigens schon zwei Jahre vor seiner Entdeckung durch Gay-Lussac von dem Franzosen JACQUES CHARLES (1746–1823) aufgestellt worden. Solche mehrfachen und voneinander unabhängigen Entdeckungen dürfen uns nicht wundern; wenn die Zeit reif ist, das heißt die gesellschaftlichen Voraussetzungen für eine Weiterentwicklung erfüllt sind, liegen die Lösungen sozusagen in der Luft und werden oft an mehreren Stellen gefunden.

Amontons teilte mit Francis Bacon und Isaac Newton die Meinung, das Wesen der Wärme liege in einer ständigen und sehr starken Bewegung von „Feuerteilchen“, die auf die Teilchen auch der fest stehenden Körper ihre Bewegung teilweise übertragen könnten. Da lag es für Amontons nahe, als Temperatur des absoluten Nullpunktes diejenige anzusehen, bei der die Bewegung der Teilchen aufhört, die Spannkraft der Luft gleich Null wird. Leider hat Amontons nicht bemerkt, daß der Siedepunkt des Wassers vom Luftdruck (Barometerstand) abhängig ist; dadurch blieben seine Messungen in ihrer Genauigkeit weit hinter seinen Berechnungen zurück.

Eine Erscheinung hatte man, wie bereits erwähnt, schon frühzeitig entdeckt: Die Flüssigkeiten dehnen sich nicht genau verhältnismäßig zur Wärmezufuhr (Temperatursteigerung) aus. Luftthermometer arbeiten da genauer. Deshalb baute man schon um die Wende vom 16. zum 17. Jh. Luft-Differentialthermometer. Die noch heute bekannte Form dieser Geräte hat JOHANNES CHRISTIAN STURM (1635–1703) gefunden und mit ihnen die Wärmestrahlung gemessen.

RUTHERFORD (1753–1819) erfand das Maximum- und Minimumthermometer. Es bestand aus zwei waagrecht liegenden Thermometern. In dem einen schob ein Quecksilberfaden einen feinen Stahlstift vor sich her, der bei fallender Temperatur liegenblieb und das Maximum anzeigte; in dem anderen lag ein feines Glasstäbchen im Ende des Alkoholfadens, das bei fallender Temperatur durch die Oberflächenspannung am Fadenende mitgenommen wurde, bei steigender Temperatur jedoch liegenblieb und so das Minimum anzeigte.

Unser Fieberthermometer ist ein Maximumthermometer; beim Abkühlen reißt der Quecksilberfaden an der verengten Stelle der Glasröhre durch. Er wird durch ruckartiges Schlagen des Thermometers wieder mit dem Quecksilber im Ausdehnungsteil verbunden.

Das erste Tiefseethermometer baute Hooke um 1691; es hielt den großen Druck des Wassers in der Tiefe aus und fixierte den tiefsten Meßwert, war also ein Minimumthermometer.

FITZGERALD (1782 gestorben) nutzte zum Messen der Temperatur die Ausdehnung des Metalls und baute als erster ein Metallthermometer. Er lötete vier Streifen verschiedener Metalle mit ihrer ganzen Fläche in Form einer Spirale aneinander, die beiden äußeren Flächen blieben frei. Ein Ende wurde befestigt, das andere mit einem Zeiger vor einer Kreisskala verbunden. Da sich die Metalle verschieden



stark dehnen, weitet sich die Spirale aus, oder sie zieht sich zusammen – dem Wechsel der Temperatur entsprechend.

Der französische Uhrmacher und Mechaniker ABRAHAM LOUIS BREGUET (1747–1823) entwickelte die Bimetall-Spiralfeder. Ein bis zwei Millimeter breite Bänder aus Silber, Gold und Platin wurden so zusammengelötet, daß das Gold in der Mitte zwischen dem sich stärker ausdehnenden Silber und dem sich weniger ausdehnenden Platin lag, und anschließend zu einem sehr dünnen Band in Spiralform ausgewalzt. Wir bedienen uns dieses Prinzips noch heute; damit ausgerüstete Relais schalten Stromkreise abhängig von der Wärmezufuhr (automatische Sicherungen, Feuermelder, Regelung der Temperatur).

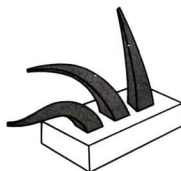
Den ersten Versuch, Thermometer für hohe Temperaturen zu bauen, unternahm Newton. In eine prismatische Eisenstange bohrte er in gleichen Abständen mehrere Löcher und füllte diese mit einer bei 100°C schmelzenden Legierung aus zwei Teilen Blei, drei Teilen Zinn und fünf Teilen Wismut. Das freie Ende dieses Pyrometers (griechisch pyr = Feuer) steckte er ins Feuer, beobachtete das Schmelzen der Füllungen und berechnete nach einem hierfür erfundenen „Erkaltungsgesetz“ die Temperatur. Ein ziemlich kompliziertes Verfahren!

Erst viel später erfand HERMANN SEGER (1839–1893) die nach ihm benannten Segerkegel, sechs Zentimeter hohe steile Dreikantpyramiden aus Silikatgemischen, die jeweils einen anderen Schmelzpunkt haben. Sie dienen zur Keramikherstellung. In den Brennofen gestellt, sinkt ein Kegel um, sobald seine Schmelztemperatur erreicht ist. Das muß überwacht werden. Die Temperatur kann damit nur annähernd ermittelt werden; aber die Kegel sind ebenso billig wie betriebsicher und deshalb noch heute in Gebrauch.

Für genaue und bequeme Messungen hoher Temperaturen benutzt man Strahlungs-pyrometer; man stellt die Temperatur der Wärmestrahlung fest, die ein über 600°C heißer Körper aussendet. Das Gesamtstrahlungs-Pyrometer mißt die Temperatur mit Hilfe eines Thermoelementes, einer Fotozelle oder eines Bolometers, bei dem die Änderung des elektrischen Widerstandes eines bestrahlten, geschwärzten Platinstreifens festgestellt wird.

Wir haben die Geschichte des Thermometers hier so eingehend dargestellt, weil am Beispiel eines so einfachen und alltäglichen Geräts deutlich wird, wie lange es dauerte und wie viele kluge Köpfe nacheinander an dieser Aufgabe arbeiten mußten, bis eine ausreichende Lösung gefunden war. Es wird ferner klar, daß die Forscher und Erfinder wußten, wie sich ihre Bauelemente einzeln und im Zusammenwirken verhielten; dagegen machten sie sich keine Gedanken über die Frage, warum das so war. Dazu war die Zeit noch nicht reif.

Beobachten der Erscheinungen; Auffinden der Gesetze, wie das alles funktioniert; Anwenden dieser Erkenntnisse in der Technik und Produktion; systematisches Erforschen des „Inneren“ der Natur, ihrer Strukturen und Kräfte – diese Reihenfolge war nur natürlich. Wie ganz anders und wieviel schneller verläuft eine solche Entwicklung heute! Aber die Voraussetzungen dafür sind erst jetzt – rund gerechnet, seit der letzten Jahrhundertwende – vorhanden: die technische und wirtschaftliche Grundlage (große Laboratorien), das breitere und tiefere Wissen, die Bereitschaft und die Möglichkeit,



Segerkegel

in kleineren und größeren Gemeinschaften zu arbeiten, die Einsicht in die technischen Notwendigkeiten von morgen.

## Wesen und Gesetze der Wärme werden erforscht

Guericks Erfindung der Luftpumpe und seine Experimente haben viele Forscher, darunter Mariotte, Hooke und Papin, zu weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet angeregt. Zumeist ging es darum, größere Wassermengen möglichst ununterbrochen zu heben. Noch in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts entstanden für die Bergwerke Pumpen, in denen das Wasser durch ineinandergreifende Zahnräder, verschiebbare Platten und Flügel, die sich schnell bewegten, angesaugt und befördert wurde. Da die wirkenden Teile in wasserdichten, mit Zufluß- und Abflußöffnungen versehenen Kapseln lagen, nannte man solche Pumpen „Kapselkünste“. Dazu gehörten auch die Urformen der heutigen Drehkolbenpumpe und der Zentrifugalpumpe.



Denis Papin

Der französische Physiker DENIS PAPIN (1647–1712), Mitarbeiter von Huygens in Paris und Boyle in London bei ihren Luftpumpenversuchen, gilt als Erfinder der Zentrifugalpumpe (Fliehkraftpumpe). Er ließ vier Flügel besonders schnell umlaufen, bildete die Flügel als

zweckmäßige Schaufeln aus und gab dem Gehäuse eine Spiralform. Diese Pumpe konnte als Lüfter (Ventilator) und als Wasserpumpe verwendet werden; beides wurde vor allem im Bergbau dringend benötigt. Was noch fehlte, war der Antrieb für die Pumpen.

Papin kannte die Eigenschaften der Luft, auch die Zusammendrückbarkeit, recht gut. Schon früh wandte er sich einem anderen Gas zu: dem Wasserdampf. Von ihm wußte er freilich wenig mehr, als daß er aus siedendem Wasser entsteht,  $100^{\circ}\text{C}$  (bei normalem Luftdruck) heiß ist und beim Abkühlen wieder zu Wasser wird. Außerdem war ihm bekannt, daß der Siedepunkt mit dem fallenden Luftdruck absinkt und mit steigendem Luftdruck steigt. Um Fleisch durch hohe Wassertemperatur besonders rasch gar zu kochen, baute er 1681 seinen Schrauben-Dampfkochtopf, der durch einen angeschraubten Deckel luftdicht verschlossen wurde. Wir kennen den Papinischen Topf heute als „Schnellkochtopf“.

Da Papin mit Recht bei steigender Erhitzung eine Explosion befürchtete, machte er – sozusagen nebenbei – eine sehr wichtige Erfindung: Er brachte das erste Sicherheitsventil an.

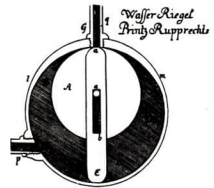
Papin bemerkte, daß beim weiteren Erhitzen des eingeschlossenen Dampfes dessen mechanische Spannung (Druck nach außen) und Temperatur stiegen. Vorrichtungen, diese Größen zu messen, gab es noch nicht. So ließ er Wassertropfen auf den heißen Deckel fallen und maß die Zeit des Verdunstens.

Der Physiker versuchte auch ein Verfahren, das an Newtons Pyrometer und das „Erkaltungsgesetz“ erinnert: Er beobachtete die Zeiten, in denen Legierungen verschiedener Schmelzpunkte auf heißem Eisen erstarrten. Das reichte zu Vergleichen, nicht aber zu Messungen aus. Offenbar erkannte Papin, daß mit dem Druck des Dampfes auf die Flüssigkeit auch die Temperatur des Dampfes und damit zugleich der Siedepunkt der Flüssigkeit steigen; umgekehrt muß dann der Siedepunkt um so tiefer liegen, je niedriger der Dampfdruck über der Flüssigkeit ist. 1685 machte Papin einen bedeutsamen Versuch. Er füllte etwas Wasser und Alkohol in eine Flasche und pumpte den freien Raum über der Flüssigkeit so weit luftleer, wie es ihm möglich war; dann verschloß er die Flasche luftdicht. Der Wissenschaftler hielt sie über ein Feuer, und die Flüssigkeit siedete schnell und heftig. Als er die Flasche vom Feuer nahm, hörte das Sieden schlagartig auf. Nun stellte er sie in eiskaltes Wasser; sofort begann das Sieden von neuem.

Das ist ein heute bekannter Unterrichtsversuch. Es war eine große Leistung Papins, diesen Vorgang 1690 in seinem Buch über Antriebskräfte folgendermaßen erklärt zu haben: „Da es eine Eigenschaft des Wassers ist, daß eine geringe Menge durch die Wirkung der Wärme verdampft und eine elastische Kraft wie die Luft hat, nach Abkühlung aber wiederum zu Wasser wird, so daß keine Spur dieser elastischen Kraft übrigbleibt, so dachte ich, man könne leicht Maschinen bauen, in denen das Wasser – nicht allzu stark erhitzt – billig ein vollkommenes Vakuum erzeugen kann.“

Für die Erzeugung und Ausnutzung dieses Vakuums baute Papin die erste Dampfmaschine. Sie war, dem Stand der Technik entsprechend, noch sehr umständlich und langsam, eigentlich mehr ein physikalisches Versuchsgerät als eine richtige Maschine; aber sie war der Beginn des Weges, auf dem Thomas Savery, Thomas Newcomen und James Watt weitergehen konnten. Der Dampf hob den Kolben

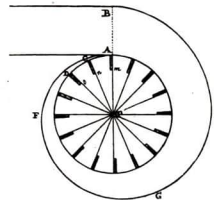
Verschiedene Pumpen, „Kapselkünste“ genannt



Wasser-Riegel von Prinz Rupprecht von der Pfalz



Klappenpumpe von Reisel



Zentrifugal-Pumpe von Papin



Papinscher Topf, wie er noch heute als Lehrmittel benutzt wird



Papins Dampfmaschine

in einem senkrechten Zylinder empor, bis er oben einrastete. Der untere Zylinderteil wurde nun von außen abgekühlt, der Dampf kondensierte, das gewünschte Vakuum war entstanden. Jetzt drückte die atmosphärische Luft den Kolben kräftig in seine Ausgangsstellung hinab. Das war der Arbeitstakt, denn diese Kolbenbewegung wurde auf ein Getriebe übertragen und konnte Arbeit verrichten. Papin benutzte abwechselnd zwei Zylinder mit Kolben am Getriebe, um die (damals ja technisch verlorene) Zeit auszunutzen, während der sich der Kolben aufwärts bewegte.

Papin hatte große Pläne mit seiner Maschine; sie sollte Wasser pumpen, Geschosse schleudern, Schiffe antreiben und anderes mehr. 1703 und 1704 baute er ein Boot mit Schaufelrädern. Als er damit nach London fahren wollte, um es dort der Royal Society, deren Mitglied er war, vorzuführen, zertrümmerte die Schiffergilde das Boot, weil sie allein das Recht hätte, die Wasser zu befahren. Papin betrieb die Schaufelräder mit Menschenkraft, wie er selbst schrieb; die Legende, er habe ein Dampfboot gebaut, ist falsch. Doch gelang es ihm als erstem, die Energie der Wärme in mechanische Energie zu verwandeln.

Der englische Physiker und Chemiker JOSEPH BLACK (1728–1799) faßte als erster die Wärme als Stoff auf und schuf eine Wärmeeinheit, die an unsere heutige Kalorie erinnert: es war bei ihm diejenige Wärmemenge, die nötig ist, um die Temperatur von 1 lb (= 1 englisches Pfund = 0,45 kg) um 1°F zu erhöhen. Die heute gültige Einheitskalorie bezeichnet die Wärmemenge, welche die Temperatur von 1 g Wasser um 1 grd (Temperaturdifferenz in °C) erhöht. Black stellte sich die Wärme als eine unwägbare Flüssigkeit vor, die alle Körper durchdringen kann und sie dabei erwärmt – also eine Art Wärmestoff. Er nannte ihn calor (auch Kalorikum) nach dem lateinischen Wort für Wärme.

Black mischte eine bestimmte Menge siedendes Wasser mit der gleichen Menge eiskaltem Wasser und fand als Mischungstemperatur genau die Mitte zwischen beiden Einzeltemperaturen. Das bestärkte ihn in seiner Meinung, der calor-Überschuß des heißen Wassers sei nun gleichmäßig auf beide Wassermengen verteilt worden.

Obwohl Black von solch falscher Voraussetzung ausging, kam er auf weitere richtige und wichtige neue Begriffe. Beim Mischen von heißem Wasser mit kaltem Quecksilber erzielte er eine Mischtemperatur, die viel höher als in der Mitte lag. Das erklärte er dadurch, daß verschiedene Körper entsprechend verschiedene Wärmekapazitäten hätten; diese seien gekennzeichnet durch die jeweilige Wärmemenge, die nötig sei, um die Temperatur um 1°F zu erhöhen. Das war ein erstaunlicher Vorgang: Ein Irrtum (der calor) wird bei den weiteren Überlegungen aufgehoben und unschädlich! Die richtige Deutung der Wärme durch die Molekularbewegung konnte später ohne Schwierigkeit den calor-Begriff ersetzen.

Ebenso verhält es sich bei dem Begriff der latenten (verborgenen) Wärme, den Black einführt; das ist die nötige Wärmemenge, um Eis in Eiswasser (beide mit 0°C) oder siedendes Wasser in Wasserdampf (beide 100°C) zu verwandeln. Black erklärte das so: Der flüssige Wärmestoff calor lockert die Struktur des Eises und läßt es flüssig werden; er lockert auch das siedende Wasser noch stärker auf und verwandelt es in ein Gas. Für uns ist es sehr reizvoll zu sehen, wie sich die Forscher damals immer mehr der Wirklichkeit näherten;

wir dürfen dabei nicht vergessen, mit welch einfachen Mitteln sie experimentieren mußten.

## Die Thermodynamik

Der französische Physiker NICOLAS SADI CARNOT (1796–1832) schloß sich der Ansicht von Black über die „Wärmeflüssigkeit“ an. Das wird verständlich, wenn wir bedenken, daß damals der Streit um das Phlogiston, den angeblich bei der Verbrennung entweichenden „Feuerstoff“, kaum beendet war. Als ANTOINE LAURENT LAVOISIER (1743–1794) nachgewiesen hatte, daß ein Körper beim Verbrennen (durch Aufnahme von Sauerstoff) schwerer wird, wollte man dem Phlogiston sogar ein „negatives Gewicht“ zuschreiben. Carnot kam dadurch zu einem Fehlschluß. Er sagte: Beim Wasserrad wird Arbeit verrichtet, indem das Wasser herabfällt; unten ist danach ebenso viel Wasser, wie vorher oben war. Also muß auch beim Kühler der Dampfmaschine ebensoviel Wärme herauskommen, wie vorher zugeführt worden ist; die mechanische Arbeit ist dadurch vollbracht worden, daß die Wärme (als Flüssigkeit gedacht) von der hohen Temperatur auf die niedrige gefallen ist, gefallen im



Sadi Carnot

Sinne einer hinunterstürzenden gewichtigen Flüssigkeit. Carnot erkannte noch nicht, daß ein Teil der fließenden Wärme in der Dampfmaschine in mechanische Energie umgewandelt wird und als Wärmeenergie verschwindet; die Wärmemenge, die noch im Kondensator ankommt, ist daher um diesen umgeformten Anteil geringer.

Auch die Arbeiten von Humphry Davy und Benjamin Thompson (Graf Rumford) hatten diesen Irrtum zunächst nicht verhindern können. Erst 1830 begriff Carnot seinen Fehler. Er löste sich von der Theorie des Wärmestoffes und erklärte nunmehr, daß Wärme nichts anderes als mechanische Bewegung der verschiedenen Stoffteilchen sei; infolgedessen könne man Wärme in mechanische Energie umwandeln – und umgekehrt. 1831 schrieb Carnot in sein Notizbuch: „... auf Grund einiger Gedanken über die Wärme stellt die Erzeugung einer Arbeitseinheit die Zerstörung von 2,7 Wärmeeinheiten dar.“ Hier trifft er eindeutig den Grundsatz der Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit. Leider ist diese Notiz seinerzeit unbeachtet geblieben. Bereits ein Jahr nach diesen Aufzeichnungen starb Carnot. Er war nur 36 Jahre alt geworden.

Carnots Name wurde überliefert durch seine Entdeckung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik (1824 veröffentlicht). Rudolf Clausius formulierte ihn 1850 so: „Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen.“

Den Forschern gab Carnot einen guten Rat für ihre Arbeit, den er auch selber befolgte. Papin und andere Praktiker sahen noch keinen Weg, den Dampfdruck und die Abmessungen von Kolben und Zylinder



Benjamin Thompson (Rumford)



der zu berechnen; sie experimentierten so lange, bis sie das gesteckte Ziel erreicht hatten. Carnot meinte, man sollte nicht bei jeder Maschine von neuem herumprobieren, sondern das verborgene Naturgesetz suchen, das für jede Wärmemaschine gilt.

BENJAMIN THOMPSON (Sir Rumford, 1753–1814) hat ein bewegtes Leben geführt. Er war Amerikaner, kämpfte aber im Unabhängigkeitskrieg auf der Seite der Engländer und wurde bei ihnen Unterstaatssekretär; schließlich ging er als Kriegsminister nach Bayern und reorganisierte dort die Armee. Thompson war also Berufssoldat, beschäftigte sich jedoch gern mit naturwissenschaftlichen Fragen, vor allem zur Natur der Wärme.

Daß Reibung Wärme erzeugt, wußte man schon von alters her. Im 18. Jh. entstand die Theorie des Wärmestoffes; man glaubte, daß durch irgendwelche chemische Änderungen und durch Abrieb oder Zerspanung die spezifische Wärme (Artwärme) und die Stoffmenge, damit also die Wärmekapazität geändert würde; der Wärmestoff käme dann zum Vorschein, und der Körper würde warm.

Thompson überzeugte diese Deutung nicht. Bei der Besichtigung einer Kanonenfabrik beobachtete er, wie man Kanonenrohre ausbohrte. Rohr und Späne wurden heiß; ihre Temperatur erhöhte sich weiter, als der Bohrer stumpf und die Reibung dadurch noch größer wurde. Thompson begann zu experimentieren: Er ließ mit stumpfem Bohrer bohren, maß Anfangs- wie Endtemperatur und wog die Späne; er ließ unter Wasser bohren, das dann nach zweieinhalb Stunden zu sieden begann. Thompson war sich bald darüber im klaren: Die wenigen Späne können die Wärmekapazität nicht so stark verändert haben, daß eine derartige Menge Wärmestoff frei wird! Gibt es wirklich diesen Wärmestoff? Er kam auf die Frage: Was ist Wärme? und zu dem richtigen Schluß: „Sie kann keine materielle Substanz sein. Es erscheint mir schwierig, wenn nicht ganz unmöglich, mir vorzustellen, daß Wärme irgend etwas anderes sein kann als das, was bei diesem Experiment (dem Kanonenrohrbohren) andauernd dem Teilstück zugeführt wurde, während die Wärme in Erscheinung trat, nämlich Bewegung.“ So führte die Beobachtung äußerer Bewegung physikalisch zur Molekularbewegung als dem Wesen der Wärme.

JULIUS ROBERT MAYER (1814–1878), ein deutscher Arzt, hatte sich schon in seiner Jugend viel mit physikalischen und chemischen Experimenten beschäftigt; als Zehnjähriger träumte er von einem Perpetuum mobile und versuchte auch – natürlich vergebens – eines zu bauen. Später nahm er die Gedanken von Benjamin Thompson auf und versuchte, durch Experimente den quantitativen (größenmäßigen) Zusammenhang zwischen mechanischer Energie und Wärmeenergie festzustellen. Er war jedoch durch seine Arztpraxis zu sehr beansprucht und kam deshalb zu keinem endgültigen Ergebnis; das blieb James Prescott Joule vorbehalten.

Mayer schrieb 1841 seine Gedanken „Über die quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte“ auf und schickte sie an die Redaktion von „Poggendorffs Annalen der Physik“, der damals maßgebenden Physik-Zeitschrift. Die Arbeit war noch recht unübersichtlich und physikalisch unvollkommen geschrieben; der Herausgeber begriff das grundlegend Neue der Darlegung nicht und lehnte sie als theoretisierend ab. Mayer trieb daraufhin fleißig physikalische Studien und überarbeitete seine Darstellung; 1842 konnte Mayer



Julius Robert Mayer

mit Hilfe Justus von Liebig's seine zweite Arbeit unter dem Titel „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“ veröffentlichten.

Während Gay-Lussac und andere entdeckt hatten, daß zum Erwärmen von 1 g Gas um 1 grad Temperatur mehr Wärme nötig ist, wenn sich das Gas dabei ausdehnt, also sein Volumen nicht gleich bleibt, folgerte Mayer daraus: Führe ich einem Gas Wärme zu und lasse das Gasvolumen (in einem Gefäß) unverändert, so steigt der Druck des Gases, das heißt seine innere mechanische Energie; zwischen Ursache (Wärme) und Wirkung (Druckerhöhung) herrscht Gleichgewicht. Anders ist es, wenn der ursprüngliche Gasdruck bestehen bleibt, das Gas sich aber ausdehnen soll. Dann muß das Gas beim Ausdehnen eine zusätzliche mechanische Arbeit nach außen vollbringen, und dazu muß ich eine weitere Wärmemenge zusätzlich zuführen, um wieder ein Energiegleichgewicht zu haben.

Diese zusätzliche Wärme ist der genannten mechanischen Ausdehnungsarbeit dann gleichwertig (äquivalent); die zusätzliche Wärme nennt man daher das mechanische Wärmeäquivalent. Mayer berechnete aus dem verschiedenen Verhalten des Gases das mechanische Äquivalent der Wärmeeinheit mit

$1 \text{ kcal} = 427 \text{ mkp.}$

Umgekehrt liefert (theoretisch) die Arbeitsmenge 427 mkp bei der Umsetzung in Wärme 1 kcal.

Mit seiner Erkenntnis begründete Mayer das wichtige Gesetz von der Erhaltung der Energie: Bei keinem physikalischen Vorgang kann Energie vernichtet oder erzeugt, sondern nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden; die Summe der Energien bleibt unverändert. Das ist der erste Hauptsatz der Thermodynamik.

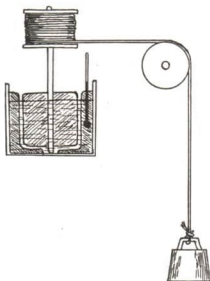
Der deutsche Physiologe und Physiker HERMANN VON HELMHOLTZ (1821–1894) betrachtete die Frage vom Wesen der Wärme – ebenso wie der Mediziner Mayer – vom Biologischen her. Aus der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile folgerte er, daß alle Lebewesen ihre Energie allein aus der Nahrung erhalten; die chemische Energie der Nahrungsmittel werde dabei in gleichwertige mechanische und Wärmeenergie umgeformt. (Hierzu ist allerdings noch



Hermann von Helmholtz

der Sauerstoff der Luft nötig.) Er meinte ferner: Wenn Wärme und andere Energiearten mechanische Bewegungen seien, dann könne man das Gesetz von der Erhaltung der Gesamtenergie im Universum schon von dem Gesetz der Erhaltung der mechanischen Energie ableiten, das im 17. und 18. Jh. aufgestellt worden war.

Der englische Physiker und Brauereibesitzer JAMES PRESCOTT



Joules Versuch zum Wärme-Äquivalent

JOULE (1818–1889) teilte die Meinung Robert Mayers, daß Energie nicht zerstört, sondern nur umgeformt werden könne. Wärme war auch für ihn mechanische Bewegung der Moleküle.

Als Mann der Industriepraxis hatte Joule für naturphilosophische Betrachtungen wenig übrig; er experimentierte. So ließ er zum Beispiel mehrere Rührschaufeln in einem mit Wasser gefüllten Gefäß schnell umlaufen. Flügelblätter (Streifen) an der Gefäßwand hinderten das Wasser, mit den Schaufeln mitzulaufen; dadurch erhöhte sich die Reibung zwischen den Schaufeln und dem Wasser. Die Schaufelachse wurde durch ein Gewichtstück angetrieben, dessen Seil über eine Rolle lief.

Joule kannte die Wassermenge und ihre Anfangstemperatur. Aus der Differenz zur Endtemperatur konnte er leicht die Menge der erzeugten Wärme berechnen. Noch einfacher war die mechanische Arbeit abzulesen: Gewicht mal durchlaufene Strecke. Joule hat diesen Versuch mehrmals unter verschiedenen Bedingungen wiederholt und damit das mechanische Wärmeäquivalent nachgewiesen, das unmittelbare Verhältnis zwischen der vollbrachten mechanischen Arbeit und der dadurch erzeugten Wärmemenge – die Zahl, die man braucht, um mechanische Energie in Wärmeenergie umzurechnen, oder umgekehrt.

Joule schrieb 1843: „Die Arbeit, verrichtet von einem Pfund über

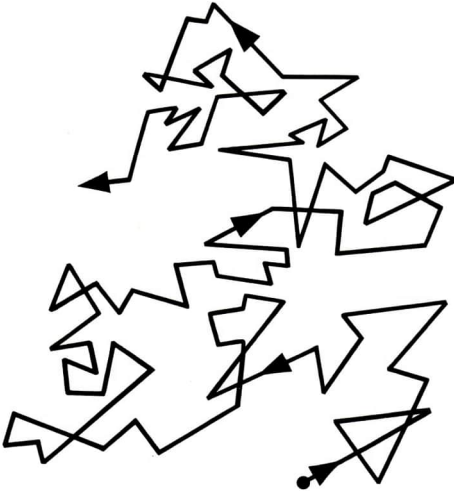


Rudolf Clausius

772 Fuß in Manchester, wird, wenn sie zum Erzeugen von Wärme durch Reibung in Wasser verwendet wird, die Temperatur von einem Pfund Wasser um ein Grad Fahrenheit erhöhen." (Gemeint ist das englische Pfund = 0,45 kg.)

Der deutsche Physiker RUDOLF JULIUS EMANUEL CLAUSIUS (1822–1888) entwickelte von 1857 an die kinetische Theorie der Gase weiter; diese Lehre, 1738 von Daniel Bernoulli begründet, geht davon aus, daß die Wärme in der Bewegungsenergie der Gasmoleküle besteht. Das ist der Ausgangspunkt zur heutigen allgemeinen kinetischen Wärmetheorie: der Lehre, daß die Wärme in der Bewegungsenergie der Moleküle besteht.

Auch Clausius baute auf dem Versuch und der Erkenntnis von Gay-Lussac auf, wonach die innere Energie eines idealen Gases vom Volumen unabhängig ist. Die Moleküle stellte er sich als winzige elastische Kugeln vor; sie würden sich nach dem Gesetz der Trägheit so lange geradlinig bewegen, bis sie mit anderen Molekülen



So ungeordnet kann sich ein Molekül bewegen

oder mit der Wand des Gefäßes zusammenstoßen. Diese Stöße an die Wand zeigten sich als Druck des Gases.

Nach Boyle-Mariotte und Gay-Lussac, so fand Clausius, ist die Bewegungsenergie der Moleküle der (absoluten) Temperatur proportional. Dies bestätigte auch das Gesetz von AMADEO AVOGADRO (1776–1856): In den verschiedenen Gasen ist unter dem gleichen Druck und der gleichen Temperatur in gleichem Volumen die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. Auch Avogadro glaubte an den Wärmestoff und hat dessen Verteilung auf die Moleküle untersucht.

Der österreichische Physiker JOSEF LOSCHMIDT (1821–1895) berechnete 1865, daß bei 0°C und Normaldruck in einem Kubikzentimeter etwa  $10^{20}$  (100 Trillionen) Moleküle enthalten sind; William Thompson kam 1885 unabhängig zu einem ähnlichen Ergebnis. Vorstellen kann man sich diese Zahl zwar nicht; dazu ist sie zu groß. Heute rechnen die Physiker mit der „Avogadroschen Zahl“ von  $2,687 \cdot 10^{19}$  Molekülen je  $\text{cm}^3$  eines idealen Gases bei 0°C und Normaldruck. Es gibt noch eine andere Größe, die „Loschmidtsche Zahl“:  $6,025 \cdot 10^{23}$ ; sie gibt die Anzahl der Moleküle an, die sich in der Masse eines Gramm-Moleküls (1 Mol) befinden.

Clausius hat die Aggregatzustände (fest, flüssig, gasförmig) und ihre Umwandlungen durch die Bewegungsenergie der Moleküle erklärt; das ist sein großes Verdienst. Er führte die Begriffe „Stoßzahl“ und „mittlere freie Weglänge“ für die sich bewegenden Moleküle ein und begründete sie; damit hat er die letzten Zweifel an der Richtigkeit der kinetischen Gastheorie beseitigt.

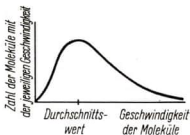
Nicht erkannt hat Clausius die Bedeutung der sogenannten Brownschen Bewegung, die der englische Botaniker ROBERT BROWN (1773–1858) im Jahre 1827 entdeckt hatte: Die zitternde, in Geschwindigkeit und Richtung ständig wechselnde Bewegung mikroskopisch kleiner Teilchen (zum Beispiel Rauch oder Staub), die sich in einem Gas oder einer Flüssigkeit befinden. Ihre Bewegung kommt dadurch zustande, daß die Teilchen von den unsichtbaren Molekülen angestoßen und in deren Rhythmus bewegt werden. So ist es möglich, die Bewegung der Moleküle indirekt sichtbar zu machen.

Weiter entwickelt haben die Wärmetheorie vor allem drei Forscher: der Deutsche LUDWIG BOLTZMANN (1844–1906), der Engländer JAMES CLERK MAXWELL (1831–1879) und der Amerikaner JOSIAH GIBBS (1839–1903).

Bereits Clausius hatte, da es nicht möglich war, den Weg jedes einzelnen Moleküls zu verfolgen, das durchschnittliche Verhalten der Teilchen untersucht. Er befand sich damit schon im Bereich der statistischen Verfahren, die – vor allem seit 1930 – immer wichtiger wurden. Sie hängen eng mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung zusammen.

Maxwell berechnete dann mit den Gesetzen der statistischen Mechanik die absoluten Größen der freien Weglängen sowie die Verteilung der Geschwindigkeit. Er zeichnete seine Ergebnisse in einer Kurve auf, der Maxwellschen Geschwindigkeits-Verteilungsfunktion. Diese Kurve zeigt ganz einfach, zu welchen Prozentsätzen Gasmoleküle von der Durchschnittsgeschwindigkeit abweichen. Im Unterricht wird diese Kurve heute auch experimentell gewonnen, mit Hilfe springender Glaskugeln, welche die Moleküle darstellen.

Damit wollen wir den „Wärmeteil“ des großen Flusses physikalischer Erkenntnis verlassen und nun verfolgen, wie ein anderer Zufluß, nämlich die Elektrizität und der Magnetismus, allmählich entdeckt und benutzt wurde.



Maxwell fand diese Kurve für die Verteilung der Molekülgeschwindigkeiten



# Magnetismus und Reibungselektrizität

## Das Anziehende wurde zuerst entdeckt

Vom Magneteisenstein (Magnetit,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mit 41 bis 70 Prozent Eisen) wußte man schon in sehr früher Zeit, daß er Eisen anzieht. Ähnlich war es beim Bernstein: Wurde er – etwa beim Herstellen von Schmuck – gerieben, zog er kleine Teilchen leichter Stoffe und Staub an.

Der erste, der sich über die Ursache dieser merkwürdigen Erscheinung Gedanken machte, war Thales von Milet; das war fast sechs Jahrhunderte v. u. Z. Aristoteles berichtete später, daß Thales diese Anziehung so erklärt hatte: Beide Körper besäßen eine Seele, seien also lebendig und versuchten gleichsam, die Teilchen einzusatmen. Zu Beginn der Wissenschaftsgeschichte ist es oft geschehen, daß ein Forscher bekannte Begriffe aus anderen Bereichen, hier des menschlichen Körpers, zu Hilfe nahm, wenn er völlig neuartige Erscheinungen erklären wollte und nichts Vergleichbares fand.

Dies war durchaus ein Fortschritt gegenüber der bisher üblichen Weise, alles auf das Wirken der Götter zurückzuführen, es war bereits eine Hypothese – wenn auch eine falsche.

Plato fand, daß von einem Magneten angezogene Eisenstücke selbst magnetisch werden. Dieser induzierte Magnetismus kann sich längere Zeit halten, entdeckte ISIDOR (570–636). Man nennt ihn den remanenten Magnetismus (lateinisch remanere = zurückbleiben).

Außer unfruchtbaren Vermutungen über die Natur der Anziehung geschah nun auf diesem Gebiet Jahrhunderte hindurch nichts Erwähnenswertes mehr.

Die erste praktische Anwendung des Magnetismus erfolgte im Kompaß. Diese Erfindung wird den Chinesen und Indern zugeschrieben. Die Zeitangaben dafür sind verschieden und unsicher; vermutlich war es um das Jahr 300. Offenbar haben die Chinesen auch schon sehr früh Stahl mit dem Magneteisenstein magnetisiert, also künstliche Magnete (Dauermagnete) hergestellt. Sie benutzten frei bewegliche Magnetsteine oder magnetisierte Nadeln (am Faden aufge-

Der Magnetberg und das eiserne Schiff



hängt oder schwingend), um bei Wagenfahrten über ihre Lößebenen und in der Schifffahrt ihren Weg zu finden. Die Magnete zeigten ihnen zuverlässig stets dieselbe Richtung an, und man brauchte nur von Fall zu Fall die richtige Abweichung davon einzuhalten.

Erst als die Araber, die mit dem Fernen Osten Handel trieben, Nachricht vom Magneteisenstein und Kompaß nach Europa brachten, begann man auch hier – im 13. Jh. –, die neue Art der Energie ernsthaft zu untersuchen.



Magnetstein

## Ein Pilger findet den Erdmagnetismus

PEREGRINUS (der Pilger – so nannte sich Peter von Mericourt, ein Freund Roger Bacons), berichtete um 1269 in einem ausführlichen Brief von allem, was damals über Magnete bekannt war, und von seinen Versuchen mit Magneteisenstein. Peregrinus hat die beiden magnetischen Pole entdeckt. Das geschah so: Er drehte einen großen Magneteisenstein ungefähr kugelförmig ab und belegte ihn, soweit es möglich war, mit kleinen Eisenstäbchen. Zu Peregrinus' Verblüffung stellten sich die Stäbchen so ein, daß ihre Längs Linien bildeten, die einander „wie die Meridiane der Erde“ in zwei Punkten schnitten. Die magnetische Kraft der Kugel schien ihm in diesen beiden Polen vereinigt zu sein. Er bemerkte auch, daß die angezogenen Eisenstückchen selbst zu Magneten wurden. Peregrinus experimentierte weiter und entdeckte: ungleichnamige Pole ziehen einander an, gleichnamige stoßen einander ab; die einzelnen Teile eines zerkleinerten Magneten sind wiederum Magnete, mit den gleichen Polen, wie der ursprüngliche Magneteisenstein sie besaß. Und nun überdachte er das alles und kam zu dem großartigen Schluß: So müssen die Eisensteine auf der Erde zu Magneten geworden sein; sie haben ihren Magnetismus vom Erdmagnetismus erhalten! Diesen wichtigen Begriff benutzte Peregrinus als erster.

Seine Entdeckung war ihm nicht zuletzt deshalb gelungen, weil er

den glücklichen Einfall hatte, seine Versuche mit einem kugelförmigen Magneten zu machen, der ein kleines Modell der Erde sein sollte. Peregrinus verstand zu experimentieren und die Ergebnisse klug auszuwerten.

Später hat er zwei Vorschläge zum Bau eines Kompasses ausgearbeitet. Bei dem ersten wird ein (natürlicher) Magnet nach seinen Polen hin mandelförmig zugeschärft und in eine schwimmende Holzschachtel gebracht, auf der die Nord-Süd-Linie markiert ist. Ein Deckel mit Kreisteilung gestattet ein leichtes Ablesen der Himmelsrichtungen.

Der zweite Vorschlag ist verwickelter und physikalisch bemerkenswert: In der Mitte einer flachen runden Messingdose mit Glasdeckel ist eine kleine senkrechte Achse aus Messing oder Silber in Spitzen gelagert; sie bewegt sich also zwischen Boden und Glasdeckel. Mitten durch diese Achse und senkrecht zu ihr ist ein Stück Eisendraht gesteckt, der sich parallel zum Boden und Deckel drehen kann – wie die Kompaßnadeln heute. Um die Kompaßnadel aus Weicheisendraht magnetisch zu machen, sollte kurzzeitig ein Magneteisenstein auf den Deckel gelegt werden.

Dieses Magnetisieren war damals üblich; es mußte immer wiederholt werden, weil die Nadeln aus weichem Eisen den Magnetismus nur kurze Zeit hielten.

Nachmals vergingen Jahrhunderte, ohne daß jemand neue Gedanken und Erkenntnisse diesem Gebiet beisteuerte. Erst mit dem 17. Jh. kam die große Wende.

## Der Vater der Elektrizität

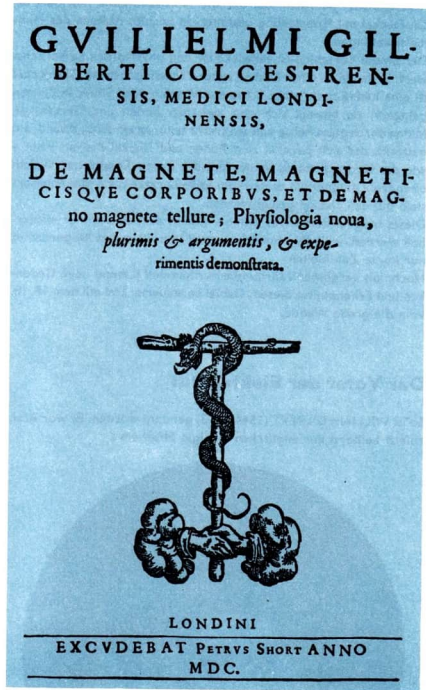
So ist WILLIAM GILBERT (1544–1603) genannt worden. Er war Arzt, zuletzt Leibarzt der englischen Königin Elisabeth I.



William Gilbert

Gilberts Werk „De magnete“ („Über den Magneten“) fand einen großen Widerhall. Es erschien im Jahre 1600; fast dreihundert Jahre vergingen, ehe es zum ersten Mal aus dem Lateinischen ins Englische übersetzt wurde.

Galilei, der zu dieser Zeit noch nichts veröffentlicht hatte, und auch Kepler kannten und benutzten das Werk. Galilei schätzte Gilbert sehr, dessen Arbeiten auch auf Descartes großen Einfluß ausübten.



Titelseite von Gilberts Werk „De magnete“

Gilbert begann, mit dem Aberglauben um den Magneten aufzuräumen. Er experimentierte mit der Magnetkugel, der *terella* (lateinisch = kleine Erde) des Peregrinus, und teilte die Ansicht, daß die Erde ein großer Magnet sei. Außer Kompassen baute er Inklinationenadeln und nahm mit ihnen Messungen vor. Er führte sie mit einem kleinen, an einem Faden aufgehängten Magneten auch am Erdmodell durch.

Bei seinen Versuchen entdeckte Gilbert die magnetische Wirkung

außerhalb des Magneten; das Magnetfeld, wie wir heute sagen. Als er es mit feinen Kompassen sorgfältig untersuchte, fand er „Wirbel“ und „Ausströmungen“, die heutigen Feldlinien.

Gilbert verstärkte die Wirkung der natürlichen Magnete (Magnet-eisensteine), indem er sie mit Eisenbändern umgab, also mit einer Art von Polschuhen versah; er stellte als erster künstliche Magnete aus Stahl her und beobachtete – ähnlich wie Peregrinus –, daß nach dem Zerbrechen jedes einzelne Stück wieder ein Magnet mit beiden Polen ist. Er zerstörte den Magnetismus durch Ausglühen und fing ihn sozusagen wieder ein, indem er den erkalteten Stahlstab in Nord-Süd-Richtung aufstellte. Guericke hatte entdeckt, daß auf dem Amboß gehämmerter Eisendraht magnetisch wurde; Gilbert wies nach, daß der Draht zu diesem Zweck in der Nord-Süd-Richtung liegen muß.

Bei der Erklärung der Ursache der magnetischen Kraft ist Gilbert freilich über die „Seele“-Theorie nicht hinausgekommen. Auch seine Versuche, einen Zusammenhang zwischen Magnetismus und Schwerkraft herzustellen, die doch beide eine Wirkung nach außen haben, blieben erfolglos; er ist heute noch nicht festgestellt worden. Aber Gilbert dachte als erster über diese Dinge nach; er sah das Problem und bemühte sich um eine wissenschaftliche Lösung, indem er experimentierte. Und gerade das bedeutete damals den großen Fortschritt!

Neun Zehntel seines Werkes „De magnete“ hat Gilbert dem Magnetismus gewidmet und nur ein Zehntel der Elektrizität; dennoch sagte er darin so viel Neues, daß er mit Recht der „Vater der Elektrizität“ genannt wurde.

Gilbert löste sich von den üblichen Bernsteinexperimenten und untersuchte alle möglichen Stoffe, bei trockener und bei feuchter Luft, im Winter und im Sommer. Er fand dabei viele, die sich beim Reiben wie Bernstein verhielten; die meisten Edelsteine, Glas, Siegelack, Schwefel und andere. Gilbert nannte sie „electrics“, auf deutsch: elektrische. Die wirkende Kraft nannte er lateinisch „vis electrica“. Daraus wurde später der Begriff Elektrizität.

Andere Stoffe wurden nicht elektrisch: beispielsweise Achat, Marmor, Knochen und viele Metalle; sie erhielten die Bezeichnung „nicht-elektrische“. Als gewissenhafter Forscher baute Gilbert ein Anzeigergerät, das erste Elektroskop, das er „Versorium“ nannte (nach dem lateinischen *vertere* = sich drehen). Es war ein kleiner Stab aus Nichteisenmetall, der mit einem Hütchen in der Mitte drehbar auf einer Spitze lag; das Instrument erinnerte an einen Kompaß, den Gilbert ebenso gebaut hatte, jedoch mit einem magnetisierten Stahlstift.

Aus der Kraft, mit der die drehbare Stange von dem untersuchten Körper angezogen wurde, schloß Gilbert auf die Stärke der „vis electrica“. Auf diese Weise stellte er eine ganze Reihe von „electrics“ auf. Genau zu messen vermochte er damit freilich nicht – er hatte ja auch keine Einheit zur Verfügung; wohl aber konnte er annähernd vergleichen.

Was fand Gilbert noch heraus? Feuchte Luft wirkt ungünstiger als trockene; eine in der Nähe brennende Kerze läßt die Elektrizität verschwinden – ähnlich wie das Glühen den Magnetismus austrieb; im Gegensatz zum Magnetismus hat die Elektrizität keine Pole, sie verliert sich auch schneller. Eines aber bemerkte Gilbert nicht: daß

es auch bei elektrischen Körpern neben der Anziehung eine Abstoßung gibt; offenbar hat er niemals zwei gleichnamig geladene Körper zusammengebracht.

Gilbert begnügte sich nicht mit den Beobachtungen und Messungen, sondern wollte die Erscheinungen auch erklären. Wenn man bedenkt, wie lange es noch gedauert hat und wie viele kluge Köpfe sich damit befaßt haben, muß man zugeben: Zu Gilberts Zeit waren viele Naturerscheinungen noch nicht zu enträtseln. Dazu bedurfte es erst zahlreicher praktischer und theoretischer Vorarbeiten. Es kam, wie es kommen mußte: Gilbert fand eine falsche Theorie.

Ähnlich den meisten Menschen, die etwas Neues erklären wollen, hielt er sich an schon Bekanntes und versuchte von dort aus ins Neuland vorzustoßen. So, wie er die magnetische Wirkung als „Ausströmung“ betrachtete, hielt er die elektrische Ladung für ein „Fluidum“, für etwas Fließendes – teils Luft, teils Flüssigkeit. Alle Körper, die durch Reibung elektrisch werden, sollten ein solches Fluidum enthalten. Würden sie durch Reibung (aber nicht durch eine Wärmequelle, etwa eine Kerze) warm, so trete das Fluidum aus dem Körper heraus, umgebe diesen wie eine Wolke und ziehe leichte Teilchen aus der Nähe zum elektrischen Körper.

Auf diesen Irrtum war Gilbert beim Beobachten einiger feuchter Holz- und Korkstückchen gekommen, die auf dem Wasser in einer kleinen Schüssel schwammen; die Stückchen glitten aufeinander zu und blieben nebeneinander liegen. Ursache war – wie wir heute wissen – die Oberflächenspannung; Gilbert aber wußte das nicht. Er glaubte vielmehr, es sei eine Eigenschaft aller Flüssigkeiten, getrennte Körper zusammenzuführen. Da er jedoch bei den elektrischen Stoffen keine Flüssigkeit beobachten konnte, mußte dieses Fluidum auch Luft sein. Dieser Schluß war gar zu gewagt, ebenso wie Gilberts Vermutung, Bernstein enthalte besonders viel Fluidum, weil er früher einmal ein Saft (Harz) gewesen sei.

Solche Irrtümer schmälern den Ruhm und das Verdienst Gilberts gewiß nicht; doch sie zu kennen ist wichtig, wenn man verstehen will, wie mühsam sich oft die Forschung entwickelte. Auch Newton glaubte ja noch, das Wesen des Magnetismus und der Elektrizität bestehe in einem „Ausfließen“.

Auch Otto von Guericke beschäftigte sich mit der Elektrizität und baute im Jahre 1660 als erster eine Elektrysiermaschine, mit der er experimentierte.

Guericke nahm einen großen Glaskolben, füllte ihn mit kleinen Schwefelstückchen, schmolz sie im Kolben zusammen und ließ alles abkühlen. Dann zerbrach er das Glasgefäß und hatte eine große glatte Schwefelkugel. Mitten hindurch bohrte er ein Loch und befestigte darin einen Eisenstab als Welle. Er legte sie in Schlitze eines hölzernen Lagergestelles; nun konnte er die Schwefelkugel mit Hilfe einer Kurbel schnell und leicht drehen. Zu einer Elektrysiermaschine gehört (außer dem Konduktor, der erst später hinzukam) ein Reibzeug. Guericke fand schnell eine Lösung: Er nahm eine Hand dazu; mit der anderen drehte er die Schwefelkugel.

Er drehte sie einige Male und berührte sie dabei mit seiner trockenen Hand. Jetzt war die Kugel aufgeladen, zog Papierschnitzel an und nahm sie bei weiterem Drehen mit sich. Das sei wie bei der Erde, meinte nun Guericke, auch sie zieht die Dinge an und hält sie bei ihrer Umdrehung fest! Er folgerte – aber falsch –, diese elektrische



Anziehung komme von den gleichen Kräften, welche die Erdanziehung bewirken und den Lauf der Planeten bestimmen; es müsse also eine einzige, überall wirksame „tragende Kraft“ geben. So schnell – gerade im 17. Jh. – die wirkenden Kräfte und ihre Ursachen in der Mechanik gefunden wurden, so langsam erkannte man die Natur der elektrischen Erscheinungen. Kein Wunder – in der Mechanik hatte man es mit sichtbaren, greifbaren Dingen und Vorgängen zu tun; die „vis electrica“ aber verbarg sich geheimnisvoll! Guericke lud eine zweite Kugel mit seiner Maschine auf und beobachtete, wie leichte Flaumfedern von ihr angezogen oder abgestoßen wurden. Er trieb eine gleichnamig aufgeladene Feder mit der Kugel durch das ganze Zimmer, sah, wie sie auf Erhebungen an Gegenständen zuflog, sogar auf die Nase einer Person im Raum; er beobachtete, wie eine geladene Feder ihre Härchen spreizte, die Nähe einer Kerze die Feder entlud und diese wieder zur Kugel flog; Guericke bemerkte bei Experimenten im Dunkeln Funken zwischen Hand und Schwefelkugel und noch manches andere.

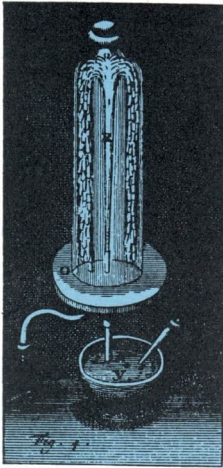
Wir wissen heute, daß er die elektrische Leitung (an einem Leinenfaden), die Influenz und die Spitzenwirkung entdeckte – als Erscheinung, als „staunenswertes Wunder selbst an den gewohnten Dingen“! Alles das beschreibt er ausführlich im vierten Buch seiner „Neuen Experimente“ mit dem Untertitel „De virtutibus mundanis“ („Von den Weltkräften“). Aber richtig erklären konnte er sie noch nicht; die Vorstellung einer materiellen und doch unsichtbaren Substanz, die solche Wirkungen hervorbringt, lag zu fern.

Merkwürdig bleibt, daß Guericke's elektrische Versuche bei den damaligen Forschern kein Echo fanden. Nur Leibniz fragte 1671 bei Guericke nach näheren Einzelheiten an; dabei blieb es. Wohl aus diesen Gründen schrieb man Guericke's Entdeckungen später anderen Forschern zu: GRAY (1729) die elektrische Leitung und (1730) die Influenz, BOSE (1738) oder erst FRANKLIN (1750) die Spitzenwirkung. WALL (1708) das Licht und das Knistern der Funken. Dabei haben diese Forscher Guericke's Ergebnisse gekannt und das auch nicht bestritten. Guericke's Leistungen auf dem Gebiet der Elektrizität standen wohl stets im Schatten seiner Arbeiten über die Mechanik. Trotzdem wurden die Experimente Guericke's später wieder aufgenommen und fortgeführt; sie waren zu sauber, zu eindeutig und zu systematisch durchgeführt worden, als daß sie auf die Dauer hätten übergangen werden können.

Anders erging es seiner irrtümlichen Theorie der „virtutes“ (Kräfte). Sie war widersprüchlich und wenig klar und wurde glücklicherweise nicht beachtet.

Robert Boyle führte die ihm bekannten Versuche Guericke's und noch viel frühere ebenfalls durch. Er zeigte, daß die Anziehung zwischen einem (an einem isolierenden Faden aufgehängten) geriebenen elektrischen Körper und einen nichtgeriebenen gegenseitig ist, also jeder den anderen anzieht. Dieses Experiment wiederholte er – Altes mit Neuem verbindend – mit Erfolg im luftleeren Raum unter einer Glasglocke. „Luftleer“ im Sinne unserer heutigen Vakuumtechnik ( $10^{-6}$  Torr und weniger) war dieser Rezipient verständlicherweise nicht, aber das Vakuum reichte aus, um klarzustellen: Diese elektrischen Erscheinungen sind vom Luftdruck unabhängig. Wir wissen heute, daß das durchaus nicht für alle gilt. In der Theorie blieb Boyle bei seiner Meinung, die Elektrizität sei eine Ausströmung.

## Das erste elektrische Licht

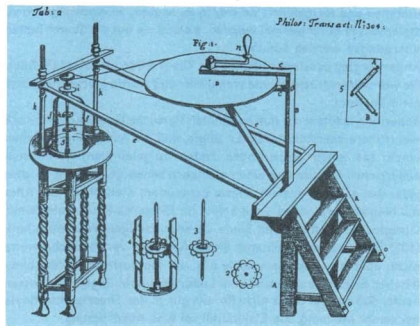


Leuchtendes Quecksilber

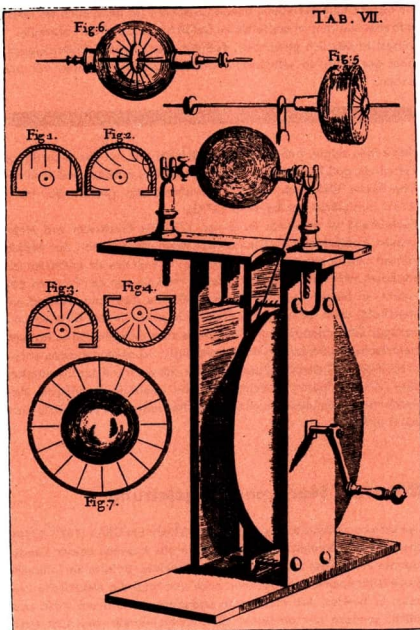
FRANCIS HAWKSBEE (gestorben um 1703), ein englischer Instrumentenbauer und Spezialist für Luftpumpen und Barometer, war Mechaniker und Assistent Newtons in der Royal Society zu London. Er hatte gehört, was der französische Astronom Jean Picard 1676 in Paris erlebte: Als Picard in einer sehr dunklen Nacht ein Barometer an einen anderen Platz trug, bewegte sich das Quecksilber im Glasrohr, und der Astronom bemerkte, wie gleich über dem Ende der Quecksilbersäule im Glasrohr etwas leuchtete – in der „Torricellischen Leere“, wie wir heute sagen. Je mehr er das Quecksilber bewegte, um so stärker leuchtete es auf.

Hawksbee erfaßte sofort, worauf es ankam: Er experimentierte weiter und ließ durch ein Röhrchen einen kleinen Strahl Quecksilber wie bei einem Springbrunnen in einen luftleeren Rezipienten spritzen. Was Hawksbee vermutet hatte, geschah: Die an der Wand der Glasglocke herablaufenden Tropfen leuchteten fahl auf, schwach nur – aber die Form des Glases war deutlich zu erkennen. Da Hawksbee die Bernsteinversuche zum Erzeugen von Elektrizität kannte, fragte er sich: Sollte hier wieder die Reibung, diesmal zwischen Glas und Quecksilber, das Entscheidende und das Leuchten eine elektrische Erscheinung sein – wie beim geriebenen Bernstein? Er baute sich eine komplizierte Maschine, mit der er im Innern eines luftleeren Rezipienten eine runde Holzscheibe, deren Rand mit Bernsteinkugeln besetzt war, durch eine Achse in rasche Umdrehung versetzen konnte; dabei rieben sich die Kugeln an zwei sich gegenüberliegenden Wollknäueln. Technisch bemerkenswert war die luftdichte Führung der Drehachse durch den Hals des Glases: Es war die erste Stopfbuchse aus Messing mit Lederpackung; Watt benutzte diese Art bald danach bei seiner Dampfmaschine.

Mit Hilfe einer großen Antriebscheibe sowie einer großen Übersetzung ließ Hawksbee die Bernsteinkugeln schnell umlaufen – und bald schon waren diese von Licht umgeben. Also war es doch die „vis electrica“! Da er schon beim Quecksilberversuch gute Erfahrungen mit Glas gemacht hatte, kam er auf den ausgezeichneten Gedanken



Hawksbee bringt Bernstein zum Leuchten



Hawksbees leuchtende Glaskugel

(wobei er wohl an Guericks Schwefelkugel dachte), eine leergepumpte Glaskugel umlaufen zu lassen und eine trockene Hand als Reibzeug anzudrücken. Das Ergebnis verblüffte: Das Innere der Kugel leuchtete so hell, daß man bei ihrem Schein große Buchstaben lesen konnte.

Hawksbee experimentierte weiter und überragte dabei als Institutsmechaniker an Gedankenreichtum manches Mitglied der Royal Society: 1709 baute er die erste Influenzmaschine und nannte die damit erzeugte Elektrizität schon Influenzelektrizität (lateinisch *influere* = hineinfließen). Bei dieser Maschine drehte sich ein luftleerer Glasbehälter im Innern eines zweiten, sich ebenfalls drehenden Gefäßes.

Hawksbee rieb eine Glasröhre mit angewärmtem Papier; sie lud sich stark auf und entlud sich mit sichtbarem und hörbarem Funken, wenn man ihr einen Finger näherte. Er pumpte die Luft aus einem röhrenförmigen Glasgefäß und rieb das Glas: Das Innere des Gefäßes leuchtete auf – vor allem in der Nähe des Fingers, wenn dieser auch außen am Glas entlang bewegt wurde. Es leuchtete auch, wenn

Hawksbee eine geriebene offene Glasröhre (es hätte auch ein Glasstab sein können) an das luftleere Gefäß brachte und dort bewegte. Längst ist deutlich geworden, daß wir hier die erste Entwicklungsstufe der heute so selbstverständlichen Leuchtstoffröhren vor uns haben.

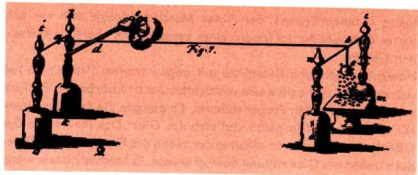
Moderne Leuchtstoffröhre

Hawksbee zeigte, daß sich die Elektrizität nur auf der Oberfläche verteilt. Er goß Pech in eine Glasschale, ließ es erkalten und fand die Oberfläche elektrisch. Gray beobachtete das gleiche bei Harz (1731) und Dufay bei Schwefel (1733).

Verblüffend ist in einem Buch von 1779 die Nachricht von einer „neuen Entdeckung“: „Chokolade, wenn sie erst von der Mühle kömmt, und in den zinnernen Pfannen, in welchen sie enthalten ist, abkühlet, wird stark elektrisch; wenn man sie von den Pfannen abnimmt, so behält sie diese Eigenschaft eine Zeit lang, verliert sie aber bald, wenn sie oft durch die Hände geht.“ In den Rührwerken heutiger Schokoladefabriken kommt es auch gelegentlich zu starken elektrischen Aufladungen der dickflüssigen Schokolademasse, ebenso bei Textil-, Plast- oder Papierbahnen, die während der Produktion über Walzen laufen. Feuchte Luft und geerdete metallische Abstreifer helfen dagegen. Auch Schallplatten laden sich beim Abspielen leicht auf.

## Die erste Hochspannungsleitung

Der schon erwähnte englische Physiker STEPHEN GRAY (1670–1736), ebenfalls ein Schüler Newtons, kannte die Arbeiten seines Landmannes Hawksbee und ergänzte sie mit Erfolg. Er wies die Influenz elektrizität noch überzeugender nach und fand die elektrische Leitung; er bewies, daß elektrische Ladungen den Körper nicht ausfüllen, sondern nur an seiner Oberfläche verteilt sind. Das letztgenannte Experiment war am einfachsten: Gray lud einen hohlen und einen vollen Würfel aus Eichenholz gleicherweise auf. Beide Würfel zeigten eine gleich starke Aufladung. Diese wichtige Erkenntnis führte später zum Faradayschen Käfig sowie zu den Hohlkabeln und Hohlseilen der Hochspannungstechnik. Alle hier geschilderten elektrischen Experimente hatten ebenfalls mit Hochspannung zu tun, nur waren die Stromstärken winzig und konnten deshalb keinen körperlichen Schaden hervorrufen – höchstens einen kleinen Schock. Erst spätere Versuche mit Batterien (parallel geschalteter) Leidener



Gray entdeckt die elektrische Leitung

Flaschen bargen für den Experimentator Gefahren, weil diese Batterien schon beachtliche Stromstärken lieferten.

Gray verschloß eines Tages eine Glasröhre an beiden Enden mit Korken, um den Staub fernzuhalten. Er rieb das Glasrohr – es zog Papierschnitzel an. Aber auch die Korken zeigten diese Eigenschaft! Gray überlegte: Kann die Glasröhre von ihrem elektrischen „Fluidum“ etwas an benachbarte Körper abgeben, fließt etwas dahin? Er verlängerte die Röhre durch Kugeln, Drähte und schließlich durch eine Hanfschnur, die in der meist feuchten Luft Englands nicht ganz trocken war und daher die hohe Spannung leitete. Und wirklich: Wenn die Röhre tüchtig gerieben wurde, zog alles, was daran hing, ebenfalls Schnitzelchen an. Gray hatte die elektrische Leitung entdeckt.

Ziemlich aufgeregt durch diese Entdeckung, verlängerte Gray die Hanfschnur auf elf Meter; er ließ sie vom Balkon aus frei nach unten hängen: Sie zog auch unten an, war also elektrisch. Grays Phantasie ließ ihn eine Freileitung sehen; er baute sie, wieder mit Hanfstücken an der Holzdecke eines Schuppens. Das Ergebnis enttäuschte sehr: Die Anziehung war nicht mehr vorhanden. Sein Freund Wheeler, in dessen Haus Gray experimentierte, riet ihm, die Leitungsschnur nicht an gleichartigen Fäden, sondern an Seidenfäden aufzuhängen. Nun war die Anziehung wieder vorhanden. Ein seidener Aufhängefaden riß. Schnell wurde er durch einen Metalldraht ersetzt. Wieder nichts! Da begriffen beide, daß es Leiter und Nichtleiter gibt.

Gray fuhr nach Hause zurück. Nun war vor seinem Experimentierdrang nichts mehr sicher. Da hängte er beispielsweise seine Tabakspfeife an Seidenfäden auf, mit der Öffnung des Kopfes nach unten, und blies damit eine Seifenblase – so groß, daß sie gerade noch am Pfeifenkopf hängenblieb. Gray hielt Papierschnitzel in die Nähe der Seifenblase und eine vorher geriebene Glasstange in das Pfeifenrohr: Die Seifenblase zog die Schnitzel an.

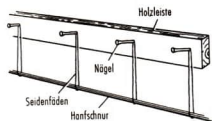
Feuchtigkeit ist also auch ein Weg für die Elektrizität, sagte sich Gray („leitet die Ladung fort“, konnte er nicht sagen, denn er war ja noch in der falschen Fluidum-Vorstellung befangen). Also müßte doch auch der menschliche Körper ein Weg sein? Und er machte 1730 seinen berühmt gewordenen Versuch mit dem elektrischen Menschen, dem „homo electrificatus“.

Einen Jungen von acht oder neun Jahren, etwa 20 Kilopond schwer (47 Pounds und 2 Unzen), legte er waagrecht in zwei hängende Schlaufen aus Roßhaar, das Gesicht nach unten gerichtet. Dicht unter dem Kopf des Jungen stand ein Schemel mit Schnitzeln von Papier und Stanniol. Kaum hatte Gray eine geriebene Glasstange an die Fußsohlen des Jungen gehalten, da flogen diesem auch schon die Schnitzel ins Gesicht.

Das machte auf alle, die das sahen oder davon hörten, einen mächtigen Eindruck. Es war ein richtiger Schauversuch, der auch mit einem feuchten Stoffband hätte durchgeführt werden können. Diese „Schau“ verbreitete die Kunde von der seltsamen Elektrizität viel mehr, als es ein Buch hätte tun können.

Gray erhielt von der Royal Society eine Verdienstmedaille.

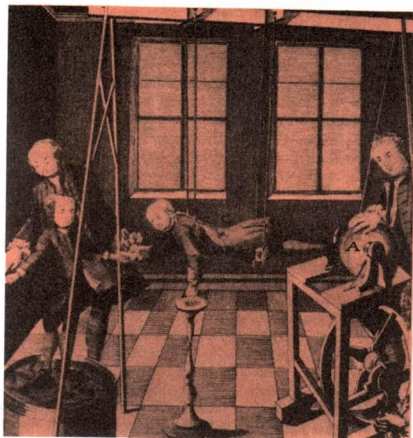
Daß der Junge schon eine elektrische Ladung zeigte, wenn Gray mit der geriebenen Glasstange nur in die Nähe der Fußsohlen kam,



Leiter und Nichtleiter



Auch der menschliche Körper  
leitet die Elektrizität



Spitzenrad

stellte Gray ebenfalls mit Erstaunen fest. Wenn er diese Erscheinung auch mit dem damaligen Stand der Theorie nicht erklären konnte, so ist ihm doch die Wirkung der Influenz klargeworden. Er entdeckte auch, daß die elektrische Ladung durch eine Spitze besonders leicht ein- oder austritt. Der Schotte ANDREAS GORDON (1712–1751) baute auf Grund der Spitzenwirkung sein elektrisches Flug- oder Spitzenrad; er wollte damit aus der Umdrehungsgeschwindigkeit auf die Stärke der Entladung schließen. Außerdem stellte Gordon das bekannte elektrische Glockenspiel als erster her.

Der Franzose CHARLES DUFAY (1698–1739) machte die wichtige Entdeckung der zwei Arten von Elektrizität. Er lud ein Stück Blattgold mit einer geriebenen Glasstange; es wurde daraufhin von jeder geriebenen Glasstange abgestoßen. Dufay näherte dem Blättchen dann eine geriebene Stange aus Kopal, einem bernsteinartigen Harz, und war sehr überrascht, als diese es anzog!

Als er nach einer Erklärung suchte, kam er auf den Gedanken, es müsse zwei verschiedene Elektrizitäten geben, die sich wie die Pole eines Magneten verhielten: gleiche stoßen einander ab, verschiedene ziehen einander an. Er nannte die eine Glaselektrizität und die andere Harzelektrizität, weil er zwei verschiedene Arten von „Fluidum“ annahm.

## Von Elektrisiermaschinen und Verstärkern

Die Begeisterung am Experimentieren mit der Elektrizität nahm ständig zu. Sie erfaßte eine wachsende Zahl von Forschern, deren Versuche wissenschaftliches Neuland erschlossen. Dieses Suchen



ging einher mit der Verbesserung und Neuschöpfung technischer Instrumente, die es gestatteten, allmählich in das Wesen der Elektrizität einzudringen.

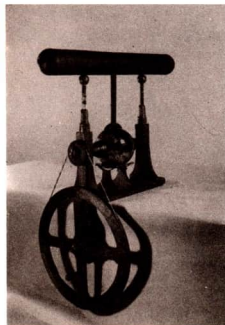
CHRISTIAN AUGUST HAUSEN (1693–1743), in Dresden geboren, lernte die neuesten elektrischen Experimente während einer Studienreise kennen, die ihn nach Paris und London führte. Nach seiner Rückkehr verbesserte er die Elektrisiermaschine, indem er einen Antrieb mit Schwungrad und Schnurlauf für die Glaskugel oder Glasröhre baute. In Leipzig richtete er als Professor ein „Experimentierkolleg für Elektrizität“ ein, das von vielen Interessierten besucht wurde.

Er beobachtete und beschrieb bei seinen Versuchen als erster die drei Arten der Entladung: Funken-, Büschel- und Lichtentladung. Im übrigen machte er die damals üblichen Vorführungen; ein in seidenen Schlaufen hängender Knabe berührte mit den Absätzen seiner Schuhe die umlaufende Glaskugel und faßte mit der Hand die eines zweiten Jungen, der auf einem Isolierschemel (Pechzuber) stand. Dieser zweite Helfer wies dann an der anderen Hand Funken auf. Er unternahm auch andere Versuche mit Anziehung und Abstoßung. Hausen beschrieb seine Versuche und deren Ergebnisse, doch die Schrift erschien erst nach seinem Tode, herausgegeben von Gottsched, dem Leipziger Literaturprofessor und Schriftsteller.

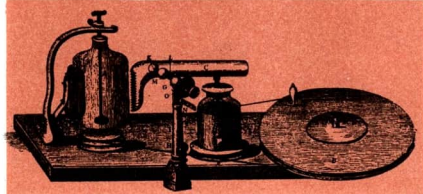
GEORG MATHIAS BOSE (1710–1761), dessen Doktorarbeit die Anziehung und die Elektrizität („De attractione et electricitate“) behandelte, legte bei seinen Versuchen 1744 an Stelle eines Knaben ein Rohr aus Eisenblech in die seidenen Schlaufen oder auf isolierte Halter. Das der umlaufenden Glaskugel zugewandte Ende schnitt er in viele feine Streifen und befestigte an ihnen ein Büschel Hanfäden, welche die Glaskugel fast berührten. Gerieben wurde die Glaskugel noch mit der Hand; die Fäden und Blechstreifen saugten die (positive) Elektrizität ab – als Vorläufer des Spitzenkammes. Das andere Ende des Rohres faßte ein isoliert stehender Helfer an, der auf diese Weise den ersten Konduktor darstellte. Bose erreichte so starke Funken, daß er mit ihnen Schießpulver entzünden konnte.

JOHANN HEINRICH WINKLER (1703–1770) fügte noch im selben Jahr – 1744 – zusammen mit dem Drechsler Giesing der bisherigen Elektrisiermaschine das Reibkissen hinzu, um das lästige Auflegen der Hand zu vermeiden. Ein Jahr vorher hatte er nach dem Tode Hausens dessen sämtliche Geräte übernommen und alle bisher bekannten Versuche wiederholt.

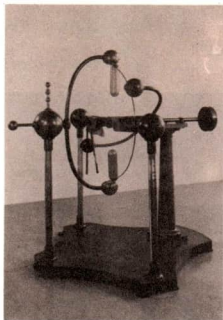
Winkler benutzte als Reibkissen Leder, das mit Zinnamalgalam (Legierung aus Zinn und Quecksilber) eingestrichen war. Man hat übrigens



Alte Elektrisiermaschine mit Glaskugel



Elektrisiermaschine  
mit zylindrischem Reibglas

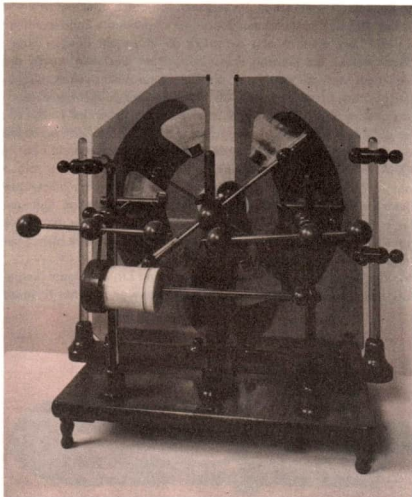


Elektrisierungsmaschine  
mit runder Reib-Glasscheibe

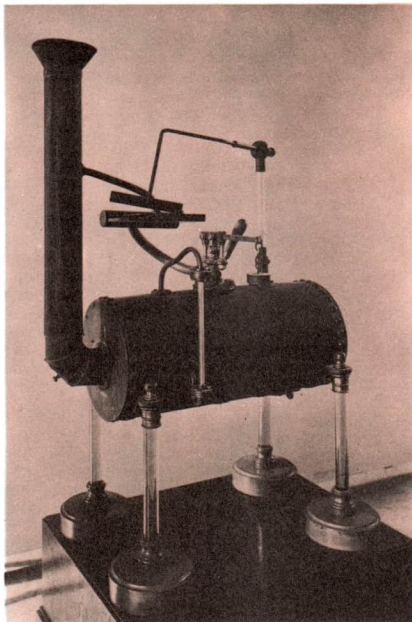
lange probiert, womit man das Leder am besten einreiben sollte. Auch mit Wachs und Öl ist es versucht worden; andere haben ein Wachstuch oder Seidentuch gewählt. Statt der Kugel benutzte Winkler später einen Glaszylinder. Zuerst war es ein sich abwechselnd vorwärts und rückwärts drehendes „gemeines Bierglas“, zwischen zwei Holzbacken gehalten und angetrieben von einer Tretvorrichtung, wie sie damals bei Drechslern üblich war. Bald nahm Winkler einen senkrechten umlaufenden Glaszylinder; zum Absaugen wurde zum ersten Male ein richtiger Spitzenkamm aus Metall angebracht. Winkler bemerkte, daß seine Maschine am besten arbeitete, wenn er das Reibkissen berührte oder durch eine leitende Säule mit der Erde verband. Diese lange Zeit hindurch gebräuchliche Konstruktion der Elektrisierungsmaschine war recht leistungsfähig; man konnte damit Kampferspiritus, Schwefeläther und ähnliches entzünden. MARTIN VON PLANTA (1727–1772), ein Schweizer Naturforscher, führte die runde Glasscheibe an Stelle der Kugel und des Zylinders ein. Diese Bauart bewährte sich sehr und setzte sich bald durch. Meist wurde die Scheibe zwischen zwei Reibkissen und zwei Abnahmekämmen hindurchgeführt.

In ihrer endgültigen Form wurde die Influenzmaschine 1864 fast gleichzeitig von AUGUST TOEPLER (1836–1912) und WILHELM HOLTZ (1836–1913) gebaut.

Die Maschine von Holtz arbeitete mit zwei gefirnißten Glasscheiben, einer größeren fest stehenden und einer kleineren umlaufenden. Später wurden die Glasscheiben durch Hartgummischeiben (Ebonit) ersetzt.



Influenzmaschine von Toepler und Holtz

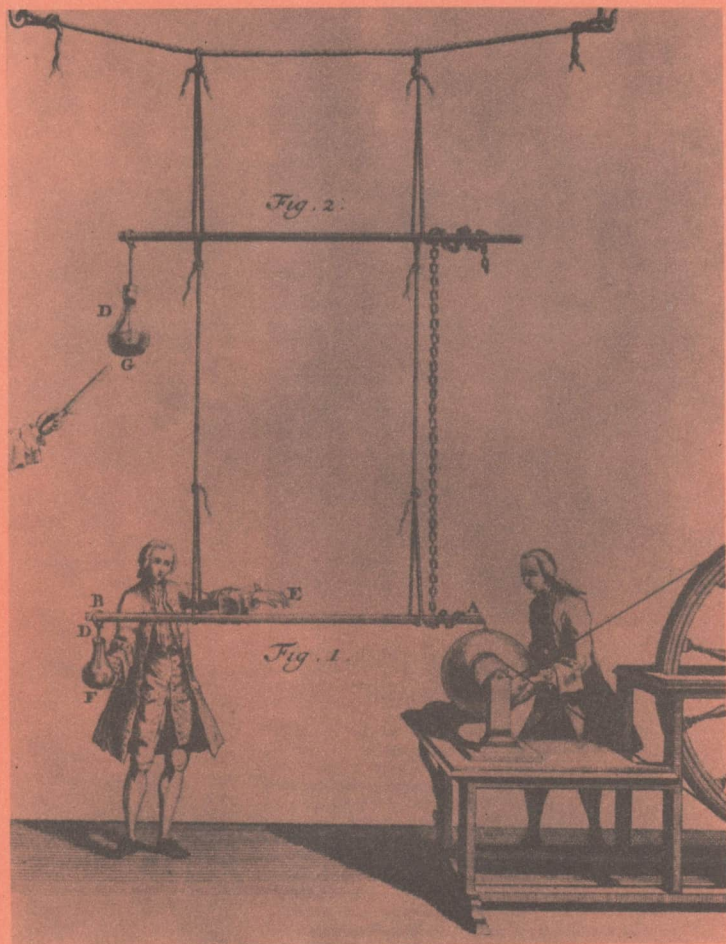


Dampf-Elektrisierungsmaschine

## Die Elektrizität wird gesammelt

Die Wissenschaftler hatten im 18. Jh. schon eine bemerkenswerte Geschicklichkeit entwickelt, Reibungselektrizität zu erzeugen und mit ihr umzugehen; sie fanden zwar für das Wesen der elektrischen Erscheinungen noch nicht die richtige Erklärung, doch das störte beim Experimentieren nicht. Es ging stets um schnelle und kurzzeitige Aufladungen; über kleine Lichterscheinungen, Funken und ungefährliche elektrische Schläge beim Menschen ging die Stärke der Aufladungen nicht hinaus.

Da sich Forscher mit dem Erreichten niemals bescheiden, wollten sie schon bald die Ladungen verstärken. Der Domherr EWALD GEORG VON KLEIST (1700–1748) kam auf einen guten Gedanken: Er nahm 1745 eine Arzneiflasche, füllte sie teilweise mit gewöhnlichem Wasser und steckte einen langen Nagel hinein, der aus der Flasche herausragte. Das Wasser, so meinte er, werde sicherlich



eine Menge „elektrisches Fluidum“ aufnehmen und in dem isolierenden Glasgefäß vielleicht eine Weile aufbewahren.

Kleist drehte seine Elektrisiermaschine mit der einen Hand, mit der anderen hielt er die Flasche so, daß der Nagel den Konduktor berührte. Es knisterte leise – offenbar ging die Elektrizität programmgemäß in die Flasche. Aber zugleich hatte das Schicksal seine Hand – besser: Kleists Hand – im Spiel: Das Wasser bildete den inneren Belag dieses Flaschenkondensators, die Flasche war das Dielektrikum (Isolator) und Kleists Hand der (ableitende) äußere Belag. Als Kleist nun den Nagel berührte, bekam er einen so gewaltigen Schlag wie nie zuvor.

Er füllte daraufhin die Flasche teilweise mit Quecksilber und wiederholte tapfer den Versuch: Der Schlag war noch heftiger! Beim nächsten Experiment stellte Kleist die Flasche während des Aufladens auf den trockenen Tisch und verband den Nagel mit dem Konduktor. Die Enttäuschung war zunächst groß, denn diesmal kam es nur zu einer geringen Aufladung – der geerdete äußere Belag fehlte.

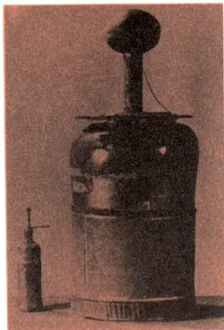
Sofort berichtete er seine Entdeckung dem Akademiemitglied Lieberkühn in Berlin, der Kleists Versuche der Akademie vorführte. Ein weiterer Bericht ging an den Danziger Bürgermeister Gralath und regte ihn zu eingehenden Experimenten an. Gralath fand die Voraussetzung für das Aufladen – ein Isolator mußte sich zwischen zwei Leitern befinden, dessen äußerer geerdet ist – und stellte durch Parallelschalten die erste Batterie Kleistscher Flaschen zusammen. So wurden diese „Verstärkungsflaschen“ nun mit Recht genannt.

In Leipzig erfuhr Winkler davon. Er wiederholte die Versuche mit Flasche und Wasser, nahm jedoch als äußeren Belag eine Metallhülle. 1746 veröffentlichte er seine Ergebnisse. Bevis klebte an Stelle des Wassers Zinnfolie (Stanniol) an die Innenwand und den Boden der Flasche, während Watson solche Folie auch als Außenbelag verwendete. Das war der Ausgangspunkt für die spätere große Entwicklung aller Kondensatoren und zugleich ein Musterbeispiel dafür, wie ein Forscher auf den Erkenntnissen des anderen aufbaut und sie fortführt, bis eine ganze Kette zwischen Anfang und (vorläufigem) Abschluß entstanden ist.

Unabhängig von Kleist beschäftigte sich kurze Zeit danach der niederländische Naturforscher PIETER VAN MUSSCHENBROEK (1692–1761) in Leiden (Leyden) mit den „Verstärkungsflaschen“. Auch er nahm eine Flasche mit Wasser, genau wie Kleist. Den ersten Schlag erhielt ein zufällig anwesender Gast.

Muschenbroek veröffentlichte die Ergebnisse seiner Arbeiten im Jahre 1751. Jean-Antoine Nollet, der zuerst von den Leidener Versuchen erfuhr, nannte die dabei benutzte Flasche Leidener Flasche; dieser Name hat sich durchgesetzt, bis ihr Alessandro Volta später die Bezeichnung Kondensator gab.

Die größeren Leistungen der Elektrisiermaschinen mit Batterien Leidener Flaschen gab den „elektrischen Gesellschaftsspielen“ neuen Auftrieb. Lange Reihen von Soldaten oder Mönchen stellten sich auf und ließen sich elektrisieren. Feuer wurden entzündet, Sprüh- und Lichtexperimente gemacht. Es fiel auf, daß auch bei der längsten Menschenkette alle Beteiligten gleichzeitig den elektrischen Schlag erhielten; die Geschwindigkeit, mit der sich das „Fluidum“ bewegte, mußte riesengroß sein. Versuche, diese Geschwindigkeit zu messen, führten damals zu keinem brauchbaren Ergebnis.



Kleistsche Flasche



Leidener Flaschenbatterie



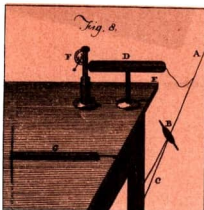
## Medicina sine medicamento



Elektroskop



Elektrometer



Elektrometer

Bald schon wurden die Wirkungen der elektrischen Entladungen von den Ärzten für Heilzwecke genutzt und als „Medizin ohne Medikament“ angepriesen. „Der Weltweisheit und Arzneikunst Doctor und Practicus in Regensburg Johann Gottlieb Schaffer“ schrieb 1752 darüber ein 92 Seiten starkes Büchlein mit dem Titel „Kraft und Wirkung der Electricitet in dem menschlichen Körper und dessen Krankheiten, besonders bey gelähmten Gliedern, aus Vernunftgründen erläutert und durch Erfahrungen bestätigt“. Das Titelbild zeigt einen Kranken und die vollständige elektrische Anlage: eine Elektrisiermaschine mit Glaszylinder, die durch einen Fiedelbogenantrieb abwechselnd rechts- und links herum gedreht werden konnte, drei nebeneinandergeschaltete Leidener Flaschen und die isoliert verlegte Leitung.

Als die Elektrizitätslehre im 18. Jahrhundert so große Fortschritte machte, wurde es erforderlich, die Stärke der Ladungen zu messen. Elektroskope, beispielsweise mit isoliert aufgehängten Holundermarkkugeln oder dünnen Metallfolien, gab es schon lange; aber sie zeigten nur an, ob eine Ladung vorhanden war oder nicht. Bestenfalls konnte man mit ihnen einige Ladungen untereinander vergleichen.

Man brauchte ein Elektrometer, bei dem man von möglichst geeichten Skalen Zahlen ablesen konnte. Der Franzose CHARLES-AUGUSTIN COULOMB (1736–1806) baute das beste Elektrometer, die Drehwaage. Sie wurde später verbessert und wird noch heute verwendet. Der waagerechte Anzeigestab mit einer Kugel an jedem Ende hing an einem feinen Metallfaden, der bei der Messung verdreht wurde. Statt der Schwerkraft benutzte man also hier die Torsionskraft als Rückstellkraft. Sie konnte in fast beliebigen Bereichen durch die Art des Aufhängefadens gewählt werden. Da das Gewicht des beweglichen Teiles durch die Aufhängung aufgehoben war, erhielt man sehr feine Messungen.

Coulomb fand mit seiner Drehwaage das nach ihm benannte Coulombsche Gesetz: Zwei elektrische Ladungen üben aufeinander eine Kraft aus, die verhältnismäßig ihrem Produkt und umgekehrt verhältnismäßig dem Quadrat ihres Abstandes ist.

BENJAMIN FRANKLIN (1706–1790), der amerikanische Wissenschaftler, ursprünglich Buchdrucker und später Staatsmann, war ein vielseitig begabter Mensch. Auf das Gebiet der Physik geriet er als Vierzigjähriger durch einen Zufall: Er sah einige recht mangelhaft durchgeführte elektrische Versuche und bemühte sich mit Erfolg, sie zu verbessern und zu ergänzen.

Später erfand Franklin den Blitzableiter. Das kam so: Er hatte beobachtet, daß ein geladener, isoliert aufgehängter Metallkörper (Konduktor) seine Ladung schnell verliert, wenn er eine Spitze hat; er verliert sie – und das war das Neue! – aber auch, wenn man ihm eine geerdete Metallspitze nähert (das wußte schon Guericke). Ein Funken springt zu dieser Spitze viel eher und weiter als zu einem runden Gegenstand.

Franklin meinte, ein Körper, der mit „Fluidum“ gerade ausgefüllt sei, wirke neutral; ein Überschuß an Fluidum mache ihn „plus“, ein Mangel „minus“ elektrisch. Die Gewitterwolke, so schloß Franklin

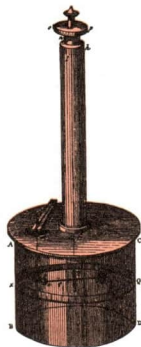


weiter, sei plus und die Erde minus elektrisch; die Wolke sei also geladen und bereit, ihren Überschuß an die Erde abzugeben. Sie tue es im Blitz, wobei sie oft großen Schaden anrichtet. Um das zu verhindern, müsse man ihr eiserne Stangen mit Spitzen entgegenstrecken – sie würden die Wolkenentladung bestenfalls still und leise aufnehmen oder schlimmstenfalls den gewalttätigen Blitz auffangen und unschädlich zur Erde leiten.

Seine Theorie von der einseitigen Richtung der elektrischen Entladung widerlegte Franklin später selbst durch ein Experiment: Er ließ den Funken einer starken Batterie durch ein Buch schlagen; danach zeigte das Loch an beiden Seiten Ränder, die nach außen gebogen waren.

Franklin übernahm die Vorstellung Winklers, der Blitz sei kein Feuer, sondern etwas Elektrisches, und schlug vor, auf einem freien Platz ein Schilderhäuschen mit einer hohen spitzen Eisenstange aufzustellen, die bis ins Innere des Häuschens reiche. Man könne dann bei Gewitter sicherlich aus dem unteren Ende der Stange „Funken ziehen“. Diesen Versuch machte dann nicht er selbst, sondern der Franzose d'Alibard. Er hatte Franklins Briefe gelesen und führte das Experiment nach dessen Angaben 1752 in Marly durch. Er hatte dabei Glück: Die elektrische Ladung zeigte sich deutlich, ohne daß der Experimentator Schaden erlitt.

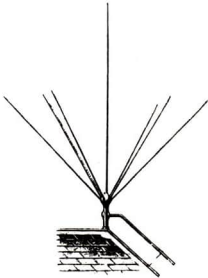
Franklin hat im selben Jahr einen mit Spitze und leitender Schnur versehenen Drachen aufsteigen lassen, um die Wolkenelektrizität



Elektrische Drehwaage



Benjamin Franklin



Franklin erfindet den Blitzableiter

zu untersuchen; ihm geschah ebenfalls nichts, obwohl er am Ende der Schnur einen Funken erzielte.

Der Blitzableiter war das praktische Ergebnis dieser und vieler ähnlicher Versuche. Jedoch erst 1760 wurde der erste in Philadelphia aufgestellt. Geistliche warnten vor dem „Zorn der himmlischen Mächte“, aber Franklin überzeugte schließlich auch seine letzten Widersacher von der Nützlichkeit seiner Erfindung. „Daß in den Kirchen gepredigt wird, macht deshalb die Blitzableiter auf ihnen nicht unnötig“, sagte der Physiker Lichtenberg dazu.

Wie klar Franklins Gedanken vom Wesen der Elektrizität waren und wie er bereits die wichtigsten Eigenschaften des elektrischen Atoms, des Elektrons, erfaßt hat, geht aus einem Brief hervor, den er 1749 schrieb; die wichtigsten Stellen seien hier wiedergegeben:

„Die elektrische Materie besteht aus äußerst feinen Partikeln, denn sie kann die gewöhnliche Materie durchdringen, sogar die dichtesten Metalle, und zwar so leicht und ungehindert, daß man keinen fühlbaren Widerstand nachweisen kann.

Sollte irgend jemand Zweifel darüber hegen, ob die elektrische Materie durch die Körpersubstanz hindurch oder nur über und an ihrer Oberfläche entlanggeht, so wird ihn ein Leidener Experiment mit einer großen elektrisierten Glasflasche, deren Schlag durch seinen eigenen Körper geht, wahrscheinlich davon überzeugen.

Elektrische Materie unterscheidet sich von gewöhnlicher Materie dadurch, daß die Teile der letztgenannten sich gegenseitig anziehen, während die der erstgenannten sich gegenseitig abstoßen; daraus ergibt sich das offenbare Auseinanderstreben der aus einer Spitze ausströmenden Elektrizität.

Trotz der Tatsache aber, daß sich die Partikel gegenseitig abstoßen, werden sie von jeder anderen Materie stark angezogen. Aus diesen drei Dingen: der äußersten Feinheit der elektrischen Materie, der gegenseitigen Abstoßung ihrer Teile und der starken Anziehung zwischen ihr und anderer Materie ergibt sich folgendes: Wenn eine Menge elektrischer Materie auf eine Masse gewöhnlicher Materie, die noch elektrische aufnehmen kann, übertragen wird, so verbreitet sich die elektrische Materie sofort und gleichmäßig durch das Ganze.

So stellt die gewöhnliche Materie eine Art Schwamm für das elektrische Fluidum dar. Ein Schwamm würde kein Wasser aufsaugen, wenn die Wasserteilchen nicht kleiner als die Schwammzellen wären, und selbst dann nur langsam, wenn nicht Wasser- und Schwammteilchen einander anziehen. Noch schneller wäre dieses Eindringen, wenn die gegenseitige Anziehung zwischen den Wasserteilchen nicht ein Hindernis wäre, denn sie müssen nun erst getrennt werden; die Wasserteilchen würden am schnellsten eindringen, wenn sie einander nicht anzögen, sondern abstießen. Genau das – nämlich einander abstoßen – tun die Teilchen der elektrischen Materie; daher dringen sie so schnell in die gewöhnliche Materie ein.

In der gewöhnlichen Materie ist aber (allgemein gesprochen) so viel elektrische Materie, als sie gerade aufnehmen kann. Wird mehr hinzugefügt, so bleibt der Überschuß außen an der Oberfläche und bildet das, was wir eine elektrische Atmosphäre nennen; man sagt dann von dem Körper, er sei elektrisiert.“ Das Zitat zeigt: Aus dem unklaren „Fluidum“ wurden materielle, „äußerst feine Partikelchen“ – der Anfang der theoretischen Entdeckung des Elektrons.



Der Engländer ROBERT SYMMER kam als erster auf den Gedanken, es müsse – im Gegensatz zu Franklins Meinung – zwei verschiedene Arten von Elektrizität in jedem Körper geben, und zwar zugleich und in gleichen Mengen, wenn der Körper elektrisch neutral wirke.

Symmer berichtete Ende 1759 auf einer Sitzung der Royal Society: „... daß die Elektrizität nicht auf einer einzigen Kraft, sondern auf zwei unterschiedlichen Kräften beruht, die durch ihr verschiedenes Wirken die verschiedenen Erscheinungen erzeugen. Und daß, wenn ein Körper plus elektrisch ist, dies nicht darauf beruht, daß er ein Zuviel von einer einzigen Art elektrischer Materie hat, sondern daß eine von zwei verschiedenen im Überschuß vorhanden ist. ... Es gibt zwei deutlich unterschiedene elektrische Fluida. Der elektrische Zustand (nach außen) besteht in einem Überschuß des einen Teils über den anderen. ...“

Symmer erklärte damit, daß die experimentell beobachteten Erscheinungen (Abstoßung, Spitzenwirkung und Influenz) unabhängig davon sind, ob ein Körper plus elektrisch oder minus elektrisch ist. Nach Franklins Auffassung hätten Unterschiede auftreten müssen. Symmer ging über die Theorie Dufays hinaus, indem er beide Elektrizitäten jedem Körper zuordnete, und nicht „plus“ dem Glas und „minus“ dem Harz.

So trugen viele Forscher dazu bei, das Wesen der Elektrizität zu entschlüsseln. Alessandro Volta prägte 1778 die neuen Begriffe Spannung und Kapazität. Mit Spannung meinte er die Neigung der Ladung, aus den spitzen Stellen eines Elektrometers zu entweichen. Für diese Neigung, so sagte Volta, sei der Ausschlag des Elektrometers ein unmittelbares Maß; diese Spannung entspreche der Kraft, welche die Strohhalm des Elektrometers spreizt. Er kam auf die „Kapazität der Platte“ des Kondensators, als er merkte, daß die Aufnahmefähigkeit des Kondensators von der Plattengröße und dem Plattenabstand abhängt.

Volta hatte schon bei den Versuchen mit seinem Elektrophor gelernt: Die Spannung erhöht sich beträchtlich, wenn man den Deckel abhebt, gleichzeitig verringert sich die Kapazität. Er erkannte bald, daß sein Elektrophor nichts anderes war als ein besonderer Kondensator, den man auch am Dielektrikum aufladen konnte. Er lud den Elektrophor sehr schwach auf; beispielsweise verband er den Metalldeckel (eine vergoldete Holzscheibe) mit einem Draht, der außen am Fenster isoliert angebracht war. Ein Elektrometer gab keinen Ausschlag. Als aber Volta nach zehn Minuten die Verbindung löste, den Deckel am Isoliergriff emporhob und an das Elektrometer hielt, schlug dieses stark aus.

„Der Elektrophor“, schrieb Volta dazu, „dient in diesem Fall mehr als Elektrometer oder Mikroelektrometer, aber ich möchte ihn lieber als Kondensator der Elektrizität bezeichnen.“

Mit diesem „Mikroelektrometer“ konnte Volta später die kleinen Kontaktspannungen zwischen verschiedenen Metallen aufspüren; das war die Grundlage für seine „Spannungsreihe“.

GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG (1742–1799) war Mathematiker, Physiker, Kunstkritiker und Schriftsteller. Er baute den größten bekannten Elektrophor mit fast zwei Meter Durchmesser; der Deckel wurde mit einem Flaschenzug gehoben. 1777 konnte er damit Funken von vierzig Zentimeter Länge erzeugen.

Lichtenbergs Studierzimmer war von feinem Harzstaub erfüllt, der



Georg Christoph Lichtenberg

beim Hobeln und Glätten des Elektrophorkuchens entstanden war und bei stärkerer Luftbewegung umherwirbelte. Er schrieb auf, was ihm dieser Staub unverhofft bescherte: „Nun fügte sich's, daß der Deckel, der von der Decke herabhing, einmal etwas längere Zeit abgehoben war, so daß der Staub auf den Kuchen selbst fallen konnte, und da geschah es, daß er sich hier nicht, wie vorher auf dem Deckel, gleichförmig anlegte, sondern an mehreren Stellen zu meinem größten Vergnügen kleine Sternchen bildete, die zwar anfangs matt und schlecht zu erkennen waren, als ich aber den Staub mit Fleiß stärker aufstreute, sehr deutlich und schön wurden.“

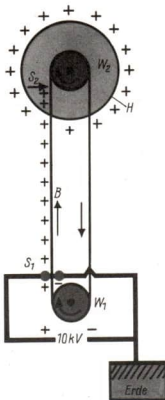
Im Dunkeln sah er, „daß aus dem Deckel leuchtende Büschel herabfuhren, die, auf den Kuchen projiziert, jene Sternchen bildeten...“

Er hatte die nach ihm benannten Figuren entdeckt. Lichtenberg setzte diese Versuche mit Leidener Flaschen fort und fand zwei Arten von Figuren: strahlenförmige („Sonnen“) aus positiver und ringförmige („Möndchen“) aus negativer Ladung. Er sah darin einen Beweis





Der Blitzableiterkäfig von Lichtenberg



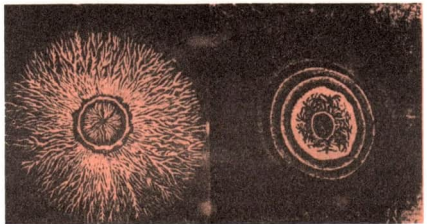
Bandgenerator (Schema)

für das Vorhandensein verschiedener Fluida und nannte die plus-elektrischen, glaselektrischen Körper positiv elektrisch und die anderen negativ elektrisch. Er meinte, mit den Zeichen  $+$  und  $-$  ließen sich gewiß auch die Mathematiker heranlocken, „denn die Naturforscher sollten alles daransetzen, die Elektrizität der Mathematik näherzubringen“.

Auch mit dem Blitzableiter hat sich Lichtenberg beschäftigt. Er empfahl, die Stangen ganz fortzulassen und dafür einen Bleistreifen den ganzen Dachfirst entlangzuführen und gut zu erden, am besten aber „das Wohnhaus unter einem metallenen Käfig zu stellen“. Erst ein halbes Jahrhundert danach schuf Faraday diesen Käfig!

Wir sind am Ende des Abschnitts über die Reibungselektrizität, die statischen, ruhenden Ladungen und schnellen Entladungen, angelangt. Wenn auch die hier dargelegten Erkenntnisse nicht – wie später das Wissen um die strömende, galvanische Elektrizität – gleich zu großen Maschinen und einer schnell anwachsenden Industrie geführt haben, so waren sie doch eine dafür unbedingt nötige geistige Voraussetzung. Die Reihe der Entdeckungen reichte von der einfachen Anziehung und Abstoßung über das Feld mit seinen Linien zur Influenz, die zur Grunderkenntnis für den heutigen Bandgenerator wurde und auch in vielerlei Influenzmaschinen noch ausgenutzt wird; von neuen Begriffen wie Spannung und Kapazität zum Bemühen um meßbare Ergebnisse und zur – wenn auch langsamen – Annäherung an die Erkenntnis vom Wesen der Elektrizität!

Wir wissen heute, daß Dufay und Symmer im Rahmen ihrer möglichen Vorstellungen recht hatten mit den zwei Arten elektrischer Materie, daß Lichtenberg sie vernünftig benannte; wir können die geistige Leistung der Forscher nicht hoch genug einschätzen, die bei ihrer Suche von der immateriellen Seele über die nicht viel besser vorstellbare Flüssigkeit mit Gaseigenschaften zu den zwei Arten eines materiellen Fluidums und schließlich – mit Franklin – zu dem vorstießen, was wir heute als Elektronen und Protonen bezeichnen.



Lichtenbergsche Figuren





# Die strömende Elektrizität

Es war bekannt, daß die Kampffische, zum Beispiel Zitterrochen und Zitterwels, elektrische Schläge austeilen können, die denen der Elektrysiermaschine und Leidener Flasche sehr ähnlich sind. Réaumur hatte noch 1714 gemeint, diese Elektrizität würde durch rasche Muskelbewegungen erzeugt (entsprechend den Bewegungen beim Reiben von Glasstäben etwa). Im Jahre 1773 fand aber Walsh bei der Zergliederung eines Zitterrochens hinter dem Schädel, zwischen den Kiemen, ein elektrisches Organ aus über tausend winzigen, organischen galvanischen Elementen. Er bezeichnete sie richtig als Batterie, dachte jedoch dabei an Leidener Flaschen; das Volta-Element war ja noch nicht erfunden. John Hunter entdeckte im selben Jahr eine noch stärkere Batterie in einem Zitteraal; sie machte etwa ein Drittel von dessen Körpergewicht aus.

Solche Fische gibt es noch heute; sie teilen elektrische Schläge mit einer Spannung bis zu 400 Volt aus und können damit auch einen erwachsenen Menschen für kurze Zeit betäuben. Wenn die Indianer im Gebiet des Amazonas (Südamerika) solche Fische fangen wollen, schneiden sie den ersten auf und reiben sich den im Wasser stehenden Teil ihres Körpers mit der Innenseite des Fischkörpers ein; sie behaupten, dann würden sie von weiteren Tieren dieser Art nicht mehr angegriffen.

Walsh lehnte die Hypothese Réaumurs ab und erklärte ganz richtig die Muskelbewegungen dieser Fische aus einer Elektrizität im Tierkörper. Leider verallgemeinerte man jetzt: Alle Muskelbewegungen zeigten elektrische Erscheinungen, und alle Lebewesen hätten – weil sie sich ja bewegen – diese besondere Art der „tierischen Elektrizität“.

LUIGI GALVANI (1737–1798), ein italienischer Mediziner, gehörte ebenfalls zu diesen Forschern. Als Anatom und Physiologe faßte er das Problem von der biologischen Seite an und fand daher die Erklärung mit der tierischen Elektrizität einleuchtend – so sehr, daß



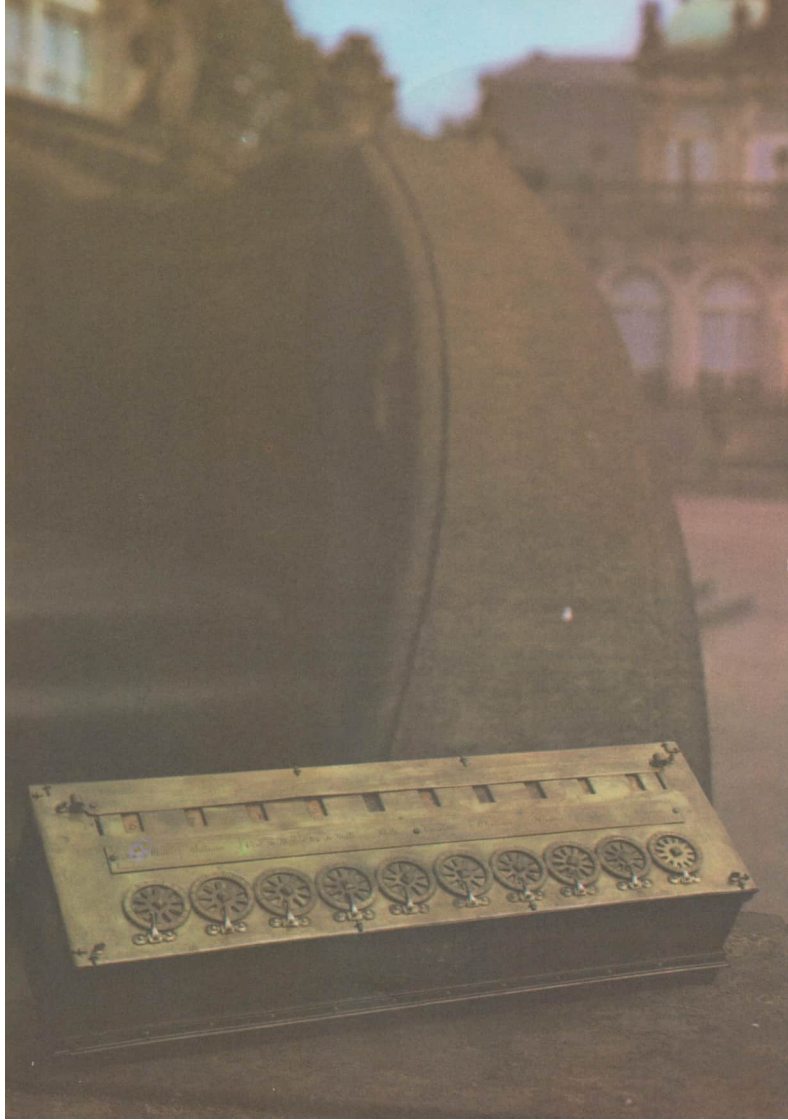
Luigi Galvani

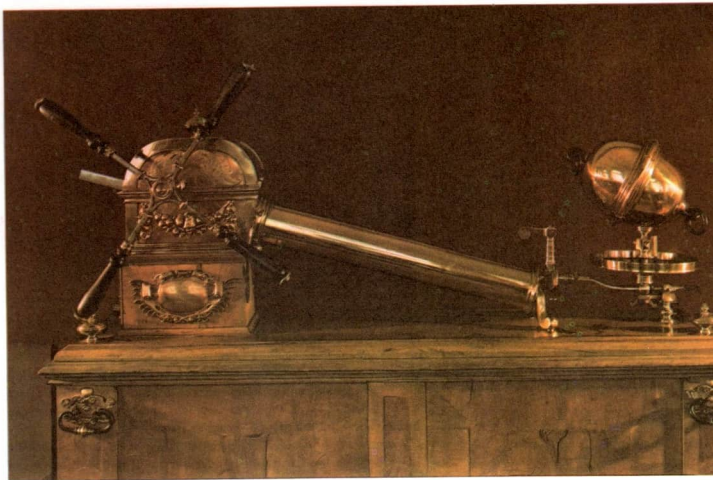
er sich davon nicht mehr trennen konnte. Er beschrieb selbst seinen berühmt gewordenen Versuch mit den Froschschenkeln:

„Ich zerschnitt einen Frosch und präparierte ihn und legte ihn, ohne etwas zu ahnen, auf meinen Tisch, auf dem eine Elektrisiermaschine stand, weit von deren Konduktor getrennt und durch einen nicht gerade kurzen Zwischenraum geschieden. Wie nun der eine von den Leuten, die mithalfen, mit der Spitze eines Skalpellmessers die inneren Schenkelnerven des Frosches zufällig ganz leicht berührte, schienen sich alle Muskeln an den Gelenken wiederholt derart zusammenzuziehen, als wären sie von heftigen Krämpfen befallen.

Der andere aber, der uns bei Elektrizitätsversuchen behilflich war, glaubte bemerkt zu haben, daß sich das ereignet hätte, während dem Konduktor der Maschine ein Funken entlockt wurde. Verwundert über diese neue Erscheinung, machte er mich, der ich gänzlich anderes vorhatte und in Gedanken versunken war, darauf aufmerksam. Darauf wurde ich von einem unglaublichen Eifer und Begehren entflammt, dasselbe zu erproben und das, was darunter verborgen wäre, ans Licht zu ziehen.

Ich berührte daher selbst mit der Messerspitze den einen oder den anderen Schenkelnerv, und in dem Augenblick entlockte einer der Anwesenden einen Funken. Die Erscheinung blieb stets die gleiche. Unfehlbar traten heftige Zusammenziehungen in den einzelnen Muskeln der Gelenke in demselben Augenblick ein, in dem der Funken übersprang, wie wenn das präparierte Tier vom Starrkrampf befallen wäre.“

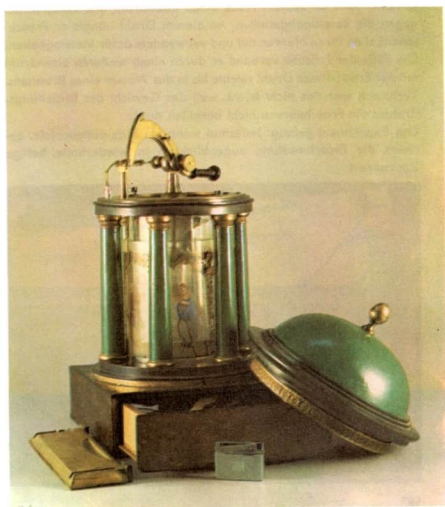




Luftpumpe von Leupold (1709)  
(zu Seite 43)

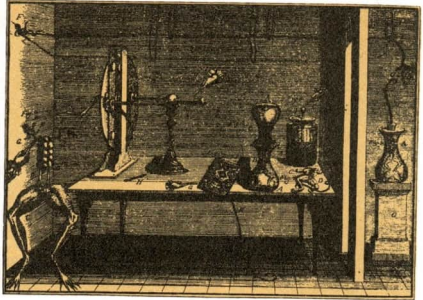
Seite 100: Die Rechenmaschine von Pascal  
(zu Seite 40)

Elektrisches Feuerzeug um 1800  
(zu Seite 40)





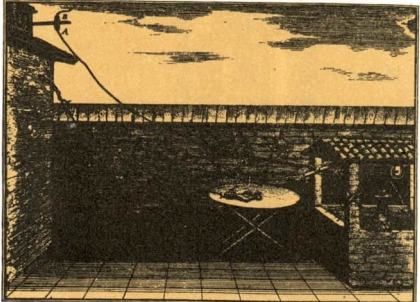
Galvanis Experiment  
mit dem Froschschenkel



Die Influenz war Galvani zwar schon bekannt, aber er war zu sehr in dem Gedanken einer tierischen Elektrizität befangen, als daß er an die Influenz als richtige Erklärung gedacht hätte. Der Wissenschaftler beobachtete jedoch bald, daß zum Gelingen des Versuches nicht nur starke Funken nötig waren; er mußte vor allem durch einen Leiter – die Klinge des Skalpells oder auch einen langen Eisendraht – mit dem Nerv verbunden sein.

Galvani wußte, daß die Funken einer Elektrisiermaschine und die Blitze des Gewitters eng miteinander verwandt sind. So kam er auf den Gedanken, seinen Versuch mit einem Blitz zu wiederholen. Er spannte oben an seinem Haus einen Eisendraht und isolierte ihn gegen die Befestigungsstellen. An diesem Draht hängte er Froschschenkel an ihren Nerven auf und verwendete dafür Messinghaken. 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 das Gewicht des Erdleitungsdrahtes die Froschnerven nicht abreißen durfte.

Das Experiment gelang. Jedesmal wenn ein Blitz aufleuchtete, gerieten die Froschmuskeln augenblicklich in wiederholte heftige Zuckungen.



Der Frosch am Balkongitter

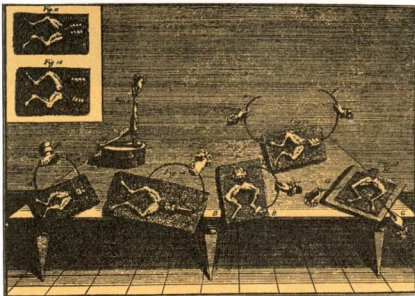


Zum Arbeitszimmer Galvanis gehörte ein Balkon mit einem Eisengitter. Auf diesem Balkon stand Galvani, als er seinen Eisendraht anbrachte. Ehe er die Frochschenkel mit den Messinghaken am Eisendraht befestigte, hängte er sie an das Eisengitter des Balkons, um sie sofort zur Hand zu haben. Die Messinghaken waren im 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, wie Galvani das schon vorher 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. Sicherlich hängt sie mit den früheren Versuchen zusammen, vermutete Galvani, doch zugleich zeigt sie etwas Neues. Er beobachtete weiter, saß viele Tage stundenlang vor Frochschenkeln am Balkongitter und wartete auf die Bewegung der Muskeln. Sie zeigte sich jedoch nur selten und ganz unregelmäßig.

Galvani fand den Grund dafür nicht und wurde schließlich ärgerlich; er drückte, um noch ein Letztes zu versuchen, die Frochschenkel an das Eisengitter. Da zuckten sie häufig und stark! Den Gedanken, die Lufterlektrizität sei im Spiel, schob Galvani bald beiseite, denn er hatte die Zuckungen ja selber ausgelöst. Endlich fand er heraus, daß die Schenkel zwischen zwei verschiedenen miteinander verbundenen Metallen liegen mußten, wenn sie zucken sollten.

Galvani hatte die Urform des „galvanischen Elementes“ entdeckt und den ersten fließenden elektrischen Strom erzeugt! Der Frochschenkel war dabei nicht nur Bestandteil dieses stromerzeugenden „Elementes“, sondern zeigte den elektrischen Strom durch die Zuckungen zugleich an. Beides mußte zusammentreffen, damit Galvani seine Entdeckung machen konnte.

Der Forscher machte sich nun mit Eifer an neue Versuche, um die wirkende Kraft und ihr Gesetz zu ergründen. Folgerichtig übertrug er die Erkenntnis des „Balkonexperimentes“ auf eine Versuchsanordnung in seinem Arbeitszimmer: Er legte die Frochschenkel auf eine Eisenplatte an Stelle des Eisengitters und berührte mit dem einen Ende des Messinghakens die Platte und mit dem anderen die Frochnerven. Wieder waren die Zuckungen zu sehen.



Galvanis Kontaktversuch im Labor



Kunstvoll gearbeitete Taschenuhren  
(zu Seite 47)

Seite 105: Globusuhr  
(zu Seite 47)



Nun folgten viele systematische Experimente mit verschiedenen Werkstoffen, mit Metallen und Nichtleitern. Es blieb dabei: Zuckungen wurden hervorgerufen, wenn zwei verschiedene, miteinander verbundene Metalle Nerv und Fuß (oder Schenkelmuskel) berührten. Die Stärke der Bewegung war abhängig von der Art der Metalle; Nichtleiter führten zu keiner Bewegung.

Schließlich legte Galvani eine Silberplatte auf den Experimentiertisch und verband einen 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 Ganze begann von neuem.

Obwohl der Anblick dieses tanzenden toten Froschschenkels recht unheimlich war, verglich Galvani als nüchterner Forscher die Erscheinung sofort mit einem elektrischen Pendel. Er sprach auch schon vom „Bogen“ – Vorahnung unseres Stromkreises – und vom „Kreislauf“, kam jedoch über die Hypothese der tierischen Elektrizität nicht hinaus. Er meinte eine besondere Art des elektrischen Fluidums, das nur dem Tier eigen ist. Das Gesetz der Erzeugung „strömender Elektrizität“ – das chemische Zusammenwirken zweier Metalle mit dazwischenliegendem Elektrolyten – blieb vorerst noch unentdeckt.

Der Arzt und Physiologe Galvani kam zu der Meinung, die Elektrizität sei die Ursache der Lebenserscheinungen. Verschiedene Gelehrte stimmten ihm auch zu, darunter Alexander von Humboldt. Zwei Hallenser Professoren, Gren und Reil, waren anderer Ansicht und sahen die Ursache der Zuckungen in den beiden verschiedenen Metallen sowie in einer großen „Reizbarkeit der Nerven für Elektrizität“. Sie haben als erste die Berührungselektrizität richtig erkannt.

Das Verdienst Galvanis wird durch seine begrenzte Erkenntnis nicht geschmälert. Er gab den ersten, entscheidenden Anstoß zur Arbeit auf einem sehr wichtigen Zweig der Naturforschung und damit unter anderem auch zur Entwicklung der gesamten Fernmelde-technik auf der Grundlage des Gleichstromes (Telegrafie und Telefonie).

Der Physiker ALESSANDRO VOLTA (1745–1827), ein Landsmann Galvanis, beschäftigte sich eingehend mit der Frage der tierischen Elektrizität; aus diesem Grunde verfolgte er die Versuche Galvanis sehr aufmerksam und wollte dessen qualitative Versuche größtmäßig, also quantitativ durchführen. „Was läßt sich Gutes, besonders in der Physik hervorbringen, wenn nicht alles auf Maß und Grade berechnet ist?“ schrieb er. Daß er dabei eine ganz neue Entdeckung machen sollte, davon ahnte er zunächst nichts.

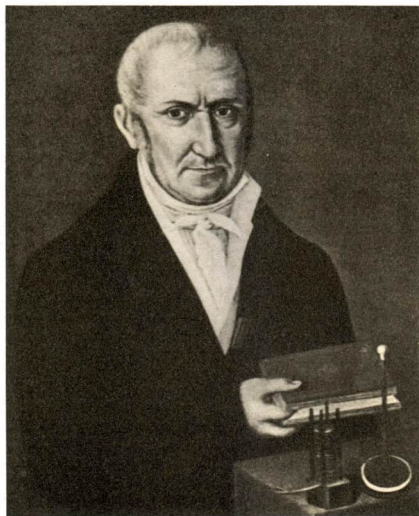
In den Fischen mit elektrischen Spannungen (Zitteraal, Zitterwels) hatte Volta besondere Organe vorgefunden, die diese Spannungen erzeugten. Die Frösche hatten keine solchen Organe. Volta sah sofort den Unterschied zwischen der tierischen Elektrizität bei diesen Fischen und der, die Galvani seinen Fröschen zuschrieb. Er drückte Galvanis Theorie etwa so aus: Nerven und Muskeln enthalten stets Elektrizität; sie befindet sich im Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht wird durch Berühren mit Metall gestört und danach durch eine Entladung über den leitenden Bügel wiederhergestellt.

Volta erkannte das klarer als Galvani; aber die Theorie war falsch, wenngleich sie den richtigen Grundgedanken enthält, daß Nerven elektrische Ströme empfangen und aussenden.

Der Aufbau und die „schlagende“ Wirkung der elektrischen Batterien in den Fischen sowie die zweite Reihe der Versuche Galvanis mit Metallen und dem dazwischenliegenden feuchten Froschschenkel brachten Volta bald auf den richtigen Weg. Er wußte, ein elektrischer Schlag kann ein Lebewesen auf dem Wege über die Nerven töten, geringere Entladungen erregen die Nerven einer bestimmten Gruppe. In diesem Sinne war der Froschschenkel ein Anzeigegeßät 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. Er legte ein Stück Metall an das obere Augenlid 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.

Bald unternahm Volta einen weiteren Versuch, diesmal mit den Geschmacksnerven: Mitten auf seine Zunge legte er eine Silber- oder Goldmünze, die durch einen feinen Draht mit einem Stück Stanniol verbunden war. Wenn er mit dem Stanniol die Zungenspitze berührte, empfand er einen säuerlichen oder erdigen Geschmack im Munde, und dieser Geschmack war dauernd vorhanden, solange sich die Metalle im Munde befanden. Das war offenbar keine plötzliche, kurze Entladung, sondern ein Dauervorgang. Volta stellte auch

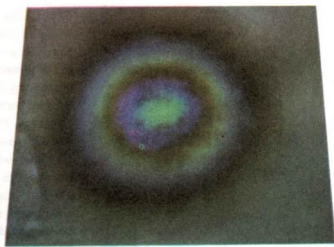
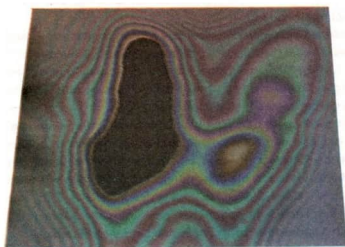
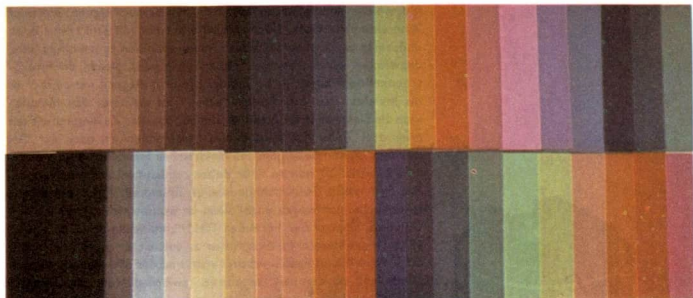


Alessandro Volta







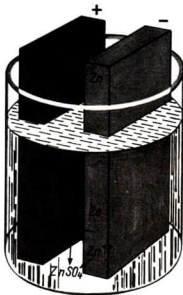


Seite 108: Spiegel-Fernrohr aus dem Jahre 1750  
(zu Seite 48)

Farbenspektrum

Newtonsche Farbenringe  
(zu Seite 51)

fest, welche Metalle sich am besten für den Versuch eignen: Blei oder Zinn einerseits, Gold, Silber, Messing (Kupfer mit Zink) oder Eisen andererseits. Zwei verschiedene Metalle mußten es jedenfalls sein, dazwischen etwas Feuchtes, Leitendes – ganz gleich, ob Froschschenkel oder menschliche Zunge. Die grundlegend neue Erkenntnis lautete: Nicht aus dem tierischen Teil zwischen den Metallen kam die Elektrizität, sie entstand offenbar aus dem Zusammenwirken aller drei Teile; das Zucken des Froschschenkels oder der Geschmack im Munde zeigten den elektrischen Strom nur an. „Metallische Elektrizität“ nannte Volta daher zunächst seine Entdeckung. Die Systematik, Folgerichtigkeit und Zähigkeit Voltas bei seinen Untersuchungen waren vorbildlich. Er wandte sich allmählich von Galvanis Theorie der tierischen Elektrizität völlig ab und begann 1794, Gegenbeweise im Experiment zu suchen. Er sagte sich: Wenn die Elektrizität im Frosch erzeugt wird und der Metalldraht nur der „Entlader“ ist, der den Stromkreis (zwischen Nerv und Muskel) schließt, dann muß auch ein Draht aus einem einzigen Metall genügen.



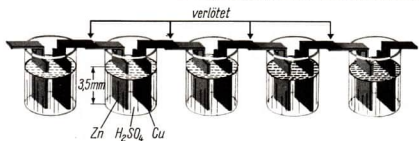
Voltas Gleichstrom-Elemente

Der Versuch zeigte wie die vorhergehenden, daß zwei Metalle nötig waren. Volta veränderte die Versuchsbedingungen. Er hängte den Nerv eines frisch hergerichteten Froschschenkels in ein Glas mit siedendem Wasser, das Muskelende in ein anderes Glas mit kaltem Wasser und verband beide Wassermengen mit einem Stahldraht, der dadurch an einem Ende heiß, am anderen kalt war: Der Froschschenkel zuckte einige Male. Volta glühte das eine Drahtende aus und ließ das andere hart bleiben: Wieder einige Ausschläge. Ähnliche Ergebnisse erhielt er bei Versuchen mit Drähten aus Gold, Silber oder Zinn.

Volta arbeitete an seiner wichtigsten Erkenntnis weiter, daß zum Erregen eines elektrischen Stromes zwei verschiedene Metalle und ein flüssiger Leiter nötig sind. Dabei vergaß er Galvani und dessen Anregung nicht, sondern sprach selbst vom „Galvanismus“, wenn er den Dauerstrom seines Elements meinte.

Das erste Primärelement der Welt war entstanden: zum erstenmal konnte man aus drei eindeutig unelektrischen Dingen – den beiden Metallen und der Flüssigkeit – ein Element zusammenbauen, das primär, das heißt, ohne erst elektrisch angeregt zu werden wie etwa ein Akkumulator, einen fließenden Dauerstrom lieferte. Das war ein riesengroßer Fortschritt gegenüber den statischen (stehenden) Ladungen der Kondensatoren in Form der Leidener Flaschen.

Volta wußte noch nichts von den Wirkungen des elektrischen Stromes, die uns heute geläufig sind: der chemischen Wirkung, magnetischen Wirkung und Wärmewirkung. Er hatte jedoch die Beobachtungen Galvanis zu einer naturgesetzlichen Erklärung geführt, hatte sie auch in vielen Versuchen erprobt und bestätigt. Volta unterschied auch positive und negative Elektrizität an seiner Anordnung und stellte die Metalle in der Reihenfolge zusammen, in der sie die meiste



Voltas Becher-Apparat

Elektrizität lieferten; wir sagen „die größte Spannung“ und nennen die Reihenfolge „Spannungsreihe“. Volta kannte den Begriff der Spannung noch nicht, aber er arbeitete damit. Deshalb hat man die Maßeinheit der elektrischen Spannung – Volt (V) – nach ihm benannt.

So sah Voltas Spannungsreihe aus: Zink, Zinn, Blei, Eisen, Kupfer, Platin, Gold und 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 und die Wirkungen an seinem eigenen Körper prüfen. Dabei dachte er an die merkwürdigen elektrischen Organe der Fische, die er untersucht hatte. Diese Organe konnten so heftige elektrische Schläge austeilen, daß ein Mensch davon stundenlang gelähmt war wie vom Schlag (Entladungsstrom) einer Leidener Batterie. Lang waren diese Organe, die einzelnen Teile wiederholten sich, lagen nebeneinander, aneinander... Da hatte Volta die Lösung gefunden! Nebeneinander stellte er nun eine Reihe seiner Becherelemente auf: Silber – Flüssigkeit – Zink, Silber – Flüssigkeit – Zink und so weiter. Dabei verband er die Silberelektrode des einen Bechers immer mit der Zinkelektrode des anderen Bechers durch einen Drahtbogen. Die Glasbecher füllte er mit Lauge. Bis zu 60 Elemente schaltete Volta in seinem „Becherapparat“ in Reihe!

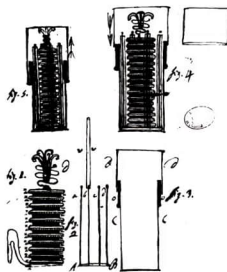
Volta fand das Gesetz, daß man die Spannung erhöht (summiert), wenn man die Elemente in Reihe (hintereinander) schaltet. Damit leistete er eine wesentliche Vorarbeit zur späteren Entdeckung des Ohmschen Gesetzes.

Die Becherreihe schien Volta auf die Dauer zu umständlich; sie nahm zu viel Platz ein. Er schnitt gleich große Scheiben aus Silber, Pappe (die er anfeuchtete) und Zink und legte sie in dieser mehrfach wiederholten Reihenfolge aufeinander. So entstand die Volta-Säule. Damit sie nicht zu hoch und dadurch unhandlich würde, unterteilte er sie in zwei oder mehr Teile, die miteinander durch Metallstücke verbunden wurden.

Die elektrischen Säulen hatten jedoch eine unangenehme Eigenschaft. Sie trockneten in ein bis zwei Tagen aus und lieferten dann kaum noch Strom (Volta sprach nun schon vom „elektrischen Strom“!). Deshalb tauchte Volta seine Säulen kurzerhand eine Weile in Wasser und trocknete sie anschließend ab. Bald fand er einen besseren Weg und umgab die frische Säule sorgfältig mit Wachs und Pech. Das war zwar nicht ganz einfach und erforderte viel Geduld; aber die Säule lieferte nun wochenlang Strom – jedenfalls so lange, bis die „Gegenspannung“ (Polarisationsspannung, die entgegengesetzt wirkt) in den Elementen zu groß wurde.

Dem Entdecker Volta erschien seine Säule dem elektrischen Organ der Versuchsfische so ähnlich, daß er vorschlug, sie „Organe électrique artificiel“ (künstliches elektrisches Organ) zu nennen. Der Name Volta-Säule aber war besser, und er setzte sich schnell durch.

Daß mehrere Forscher, unabhängig voneinander, zu gleichen Ent-



Die Volta-Säule

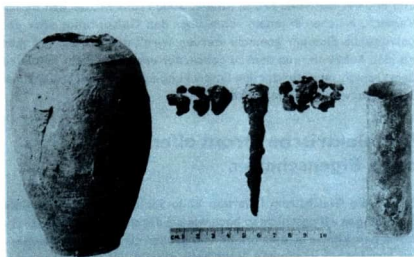


deckungen kommen, ist uns schon wiederholt begegnet. Viele Entdeckungen und Erfindungen sind auch „zu früh“ gemacht worden, wenn die gesellschaftlichen Bedürfnisse dafür noch nicht herangereift waren. Ein außergewöhnlicher Fall ist es jedoch, wenn vor Jahrtausenden eine physikalische Entdeckung bekannt und technisch genutzt wurde, dann jedoch mit der Kultur und Gesellschaft, in der sie entstanden war, zugrunde ging und völlig vergessen wurde. Genau das ist offenbar mit dem galvanischen Element geschehen, rund 2000 Jahre vor Galvani und Volta.

Burchard Brentjes berichtet darüber:

„Bei Ausgrabungen im Irak fanden Archäologen in Siedlungen, die über 2000 Jahre alt sind, die ältesten Primärelemente, die wir kennen. Einen dieser unglaublichen Funde beschreibt der Österreicher F. W. König, der ihn gemacht hat:

„In einem vasenartigen Gefäß aus hellgelbem Ton, dessen Hals abgenommen war, steckte, von Asphalt festgehalten, ein Kupferzylinder. Die Vase war etwa 15 cm hoch, das aus Kupferblech verfertigte Kupferrohr mit Boden hatte einen Durchmesser von 26 mm und eine Höhe von 9 cm. In diesem befand sich, durch eine Art Stöpsel aus Asphalt festgehalten, ein vollständig oxydiertes Stäbchen aus Eisen, dessen oberes Ende etwa 1 cm über den Stopfen herausstand und mit einer gelbgrauen, völlig oxydierten dünnen Schicht eines Metalls, dem Aussehen nach Blei, überzogen war. Das untere Ende des Eisenstäbchens reichte nicht bis auf den Boden des Zylinders, auf dem sich eine etwa 3 mm starke Asphaltsschicht befand.“



Galvanisches Element  
aus dem alten Babylon

Diese Vase aus Khujut Rabuah steht nicht allein. Ähnliche Gefäße besitzen wir aus Seleukia am Tigris, darunter auch Elemente, bei denen man versucht hatte, die Spannung durch Hintereinanderschaltung zu erhöhen. König schreibt: „Ein weithalsiges Tongefäß war mit Asphalt verschlossen, in ihm steckten Eisen- und Kupferstäbchen hintereinander, mit lang herausragenden Enden über den Verschlußpfropfen.“

Professor Pierczynski von der Universität North Carolina (USA) baute solche Zellen nach und füllte sie mit fünfprozentigem Weinessig auf. Sie lieferten 18 Tage lang eine Spannung von 0,5 V – eine technisch bereits nutzbare Spannung.

Einige Zellen, wie die von Khujut Rabuah, wurden zusammen mit Zauberschalen gefunden. Sie dienten also altirakischen Zaubernern bei ihrer Arbeit, die nicht selten in der Behandlung Kranker bestand.

Seite 112: Zweilinsiges Brennglas von Tschirnhaus (um 1690). Es diente zum Schmelzen von Metall und Brennen von Porzellan. (zu Seite 55)

Und diese Verwendung des Stroms in der Medizin könnte vielleicht erklären, woher die Iraker den Strom kannten. Noch heute benutzen arabische Volksheilkundige natürliche Stromquellen zur Behandlung Rheuma- und Gichtkranker. Die Beine der Patienten werden ruckartig in Holzwannen gesteckt, in denen Zitterrochen schwimmen. Die Tiere geben zur Abwehr der Eindringlinge Elektroschläge ab.

Die Stromquellen der alten Iraker würden auch ausreichen, um Kupfergeräte galvanisch zu versilbern – und in der Tat finden sich auf manchen Kupfererzeugnissen jener Zeit Reste eines Edelmetalls, der wohl nur von einer Silberschicht auf dem Kupfer stammen dürfte.“

Volta hatte noch an das elektrische Fluidum geglaubt. Das hinderte ihn nicht, mit seinen Entdeckungen den Weg für zahlreiche weitere zu öffnen und die erste Voraussetzung für ein großes technisches Gebiet, die Gleichstromtechnik, zu schaffen. Er hat mit seiner Arbeit den ersten Grundstein zur Elektrodynamik gelegt, der Lehre von der strömenden Elektrizität und ihren Wirkungen.

Merkwürdig ist, daß Volta mit seiner Säule seine Lebensarbeit als Forscher abgeschlossen hat. Mit dem elektrischen Strom, den er der Menschheit entdeckt hatte, wußte er offenbar nichts mehr anzufangen und überließ alle die wertvollen Folgeentdeckungen anderen.

Volta wurde schon zu Lebzeiten anerkannt und geehrt; im November 1801 führte er in der Pariser Akademie seine Experimente vor. Napoleon Bonaparte war unter den Zuhörern; er war so begeistert, daß er zwei wertvolle Preise stiftete: 3000 Franken „für den besten Versuch, welcher in jedem Jahre über den Galvanismus oder das galvanische Fluidum gemacht werden wird“, und „60000 Franken als eine Aufmunterung dem zu geben, der uns in der Elektrizität und dem Galvanismus durch seine Entdeckungen und Versuche um einen Schritt vorwärts bringen wird“.

## **Der elektrische Strom offenbart seine Eigenschaften**

Es gab die Gleichstrom liefernde Volta-Säule; kleine und mittlere Spannungen – längst nicht so hoch wie bei der statischen Elektrizität – sowie beachtliche Stromstärken, viel größer als die bisher gewohnten, standen zur Verfügung. Volta hatte gezeigt, wie (nach der damaligen Auffassung) zwei Platten aus verschiedenen Metallen in Salzwasser die beiden elektrischen Fluida voneinander trennten. Sie saßen als entgegengesetzte Ladungen – positive und negative – dauernd an den herausragenden Enden der Platten, auf Abruf gewissermaßen. Volta hatte ihre Enden durch einen Draht verbunden und bewiesen, daß jetzt kein kurzer, heißer Funke die Fluida wieder vereinte, sondern ein Dauerstrom floß, der den Draht langsam und ständig erwärmte. Offenbar, so meinte er, prallen hier die durch die Metalle ständig wieder getrennten Fluida aufeinander. Wenn das auch nicht zutraf, so hatte er doch als erster die Wärmewirkung des elektrischen Stromes entdeckt!

Voltas Leistungen haben auch einen umfangreichen und fruchtbaren wissenschaftlichen Gedankenaustausch eingeleitet. Im Meinungsstreit um die Wirkungsweise seiner Säule stand Volta jedoch auf



der falschen Seite – unterstützt von mehreren Gelehrten, darunter Humphry Davy, der mit seiner „Kontakttheorie“ erklären wollte, die Elektrizität entstünde durch den Kontakt der verschiedenen Metalle aus dem Nichts; das aber wäre ein – niemals mögliches – Perpetuum mobile. Andere Forscher, denen sich um 1840 Michael Faraday anschloß, fanden die richtige Erklärung: Die Elektrizität entsteht in einer chemischen Umsetzung; das Zink wird verbraucht, am Kupfer entstehen Wasserstoffbläschen.

Der Engländer ASH in Oxford entdeckte diese chemische Wirkung des galvanischen Stromes im Jahre 1795; er 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 (Silberplatte) der Volta-Säule, das Silber im Glasbecher mit dem Zink der Stromquelle.

Ganz deutlich war zu beobachten, wie das blanke Zink grau wurde und an der Silberplatte Gasblasen aufstiegen. Diese erste Beobachtung genügte noch nicht zur Erklärung. Ash erkannte die graue Schicht über dem Zink als Zinkoxid. Dann fing er die Gasbläschen im wassergefüllten, mit der Öffnung nach unten gehaltenen Probierglas auf, untersuchte sie und stellte Wasserstoff fest. Das Gas brannte und bildete dabei Wasser. 1796 berichtete Ash Alexander von Humboldt von seinen Experimenten; er meinte, auf der Silberplatte habe sich ein „feiner weißer Staub“ gebildet. Humboldt wiederholte Ashs Versuche und erkannte den „Staub“ richtig als feine Wasserstoffbläschen; er nannte dieses Experiment daher: Wasserzersetzung durch den Galvanismus.

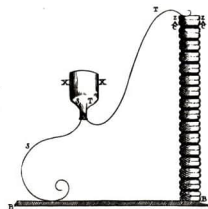
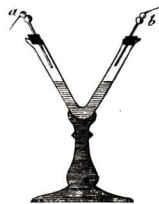
Im Jahre 1800 kamen die beiden Engländer ANTONY CARLISLE (1768–1840) und WILLIAM NICHOLSON (1753–1816) zu der gleichen Beobachtung wie Ash. Sie leiteten den Strom einer Volta-Säule von 17 Elementen über zwei Messingdrähte in Wasser. Der vom positiven Pol kommende Draht – heute Anode genannt – wurde im Laufe von  $2\frac{1}{2}$  Stunden dunkelorange und dann schwarz; schließlich sonderten sich kleine Wölkchen ab, die sich erbsengrün färbten und zu Boden sanken: Kupferoxid, durch Einfluß des frischentstandenen und dann besonders wirksamen Sauerstoffes hervorgerufen.

Am negativen Pol (der Katode) stiegen währenddessen kleine Bläschen auf. Mit der gleichen Menge Luft vermischt, verpuffte dieses Gas beim Nähern einer Flamme; es war Wasserstoff.

Nicholson benutzte anschließend für beide Zuleitungen Platindrähte, weil er wußte, daß sie auch durch Sauerstoff nicht angegriffen werden; er erhielt Sauerstoff am positiven und Wasserstoff am negativen Pol. Obwohl er die Gase nicht getrennt auffangen konnte, entdeckte er, daß doppelt soviel Wasserstoff wie Sauerstoff entstand.

Bei ihren weiteren systematischen Versuchen fanden Nicholson und Carlisle, daß die Zersetzung zunahm, wenn man die Drahtenden einander näherte, und daß sie bei größerer Entfernung abnahm und schließlich aufhörte. Damit hatten die Forscher die Wirkung des elektrischen Widerstandes des Wassers beobachtet, ohne dafür schon eine Erklärung zu finden.

JOHANN WILHELM RITTER (1776–1810) in Jena 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, daß dabei wieder dasselbe Wasser entsteht, das er vorher zersetzt hatte.



Ritters Wasserzersetzungsgerät



Humphrey Davy

Ritter entdeckte noch etwas sehr Wichtiges, das später eine besondere Technik auslösen sollte: Er führte einen Strom durch eine Kupfervitriol-Lösung (Kupfersulfat) und fand, daß sich die Lösung zersetzte und Kupfer an der einen Zuleitungsplatte niederschlug; die Platte wurde verkupfert.

Mit all den Versuchen dieser Forscher waren nicht nur die grundlegenden Erkenntnisse für die Elektrolyse geschaffen, sondern auch Impulse für die Entwicklung der Elektrochemie und chemischen Industrie gegeben worden; durch die Entdeckung des Naturgesetzes von der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes, von der elektrischen Leitung, bei der sich der durchflossene Stoff chemisch verändert.

Der Engländer HUMPHRY DAVY (1778–1829) baute eine Volta-Batterie von über 200 Plattenpaaren aus Zink und Kupfer und zersetzte mit ihrem starken Strom verschiedene chemische Verbindungen. Faraday hat dieses Verfahren später Elektrolyse genannt (griechisch *lyein* = lösen).

1807 schmolz Davy mit Strom Pottasche, die bisher als ein chemisches Element galt, in einem Platinlöffel und mit einem Platindraht und gewann dabei als erster metallisches Kalium. Auch Natrium, Kalzium, Barium, Strontium und Magnesium stellte er elektrolytisch her. Er fand ferner ein Verfahren, um die Elektrizitätsmenge zu messen, indem er die bei der Elektrolyse von Wasser entstehenden Mengen

von Sauerstoff und Wasser zugrunde legte. Man nannte das Gerät dafür Voltameter oder Galvanoskop; der letztgenannte Name wurde später nur noch für das heute noch benutzte elektromagnetische Meßgerät benutzt.

## Die elektrische Nachrichtentechnik macht die ersten Schritte

Ende des 18. Jh. wurde der optische Telegraf des französischen Ingenieurs CLAUDE CHAPPE sehr bekannt. Er bestand aus einer Säule mit einem oben angebrachten drehbaren Querbalken; an beiden Enden trug er je einen Arm, der sieben verschiedene Stellungen zuließ. Dieser Telegraf konnte nur auf Sicht arbeiten; bei Nacht und Nebel fiel er aus. Ein weiterer Nachteil war, daß jeder die Nachrichten mitlesen konnte.

Das Bedürfnis, Nachrichten schnell weiterzugeben, wurde immer größer, und es gab viele kluge Leute, die aufmerksam das Tun der Physiker beobachteten, gelegentlich auch selber experimentierten und dann versuchten, einen brauchbaren Telegrafen zu schaffen.

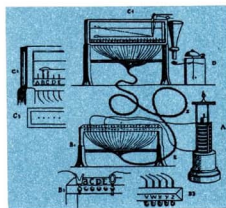
Im Februar 1753 wurde in einer englischen Zeitschrift von einem unbekannten Verfasser vorgeschlagen, „24 Drähte getrennt und isoliert auf gemeinsamen Trägern, die in 20 Ellen (etwa 13 m) Entfernung stehen sollen, in die Ferne zu leiten, um einen Buchstaben nach dem anderen durch die dafür bestimmten Drähte mittels der Leidener Flasche zu bezeichnen, was sich an der anderen Station durch Anschlagen eines Glöckchens oder durch die Abstoßung zweier Holundermarkkugeln bemerkbar machen sollte“. Für jeden Buchstaben sollte eine getrennte Leitung gelegt werden; jede Leitung endete am Empfänger in zwei nebeneinanderhängenden Kugeln aus Holundermark.

Schickte man die Ladung der Leidener Flasche oder einer Elektrisiermaschine zum Beispiel in die vierte Leitung, so spreizten sich die zum Buchstaben d gehörenden Kugeln auseinander, weil sie gleichnamig aufgeladen wurde. Anschließend mußte die Leitung durch kurzes Verbinden mit der Erde entladen werden.

Obwohl dieses Verfahren recht umständlich war, wurde ein solches Gerät in Ermangelung eines besseren 1774 in Genf gebaut. Auch zwischen Madrid und Aranjuez ist ein ähnlicher „Correspondenz-Apparat“ eingerichtet und benutzt worden. Aber er bewährte sich nicht; das ständige Aufladen der Leidener Flaschen war zu mühsam, und die Drahtleitungen waren kostspielig und schwer zu überwinden.

Das wurde besser, als sich der Anatom und Physiologe SAMUEL THOMAS SÖMMERING (1755–1830) entschloß, den galvanischen Strom für diesen Zweck zu nutzen. Er nahm 27 Leitungen und als Elektroden in einer Salzlösung ebenso viele vergoldete Drahtenden, die vom aufsteigenden Sauerstoff nicht zersetzt wurden. Die Stromquelle war eine Volta-Säule; der Geber war als Kontaktleiste gebaut. Da eine gemeinsame Rückleitung fehlte, wurden immer zwei Buchstaben gewählt; es galt dann derjenige, an dem das meiste Gas – Wasserstoff – aufstieg.

Sömmerring wurde seiner Erfindung nicht froh, obwohl er über eine Leitung von 10 Kilometern telegraphieren konnte. Es waren gar zu



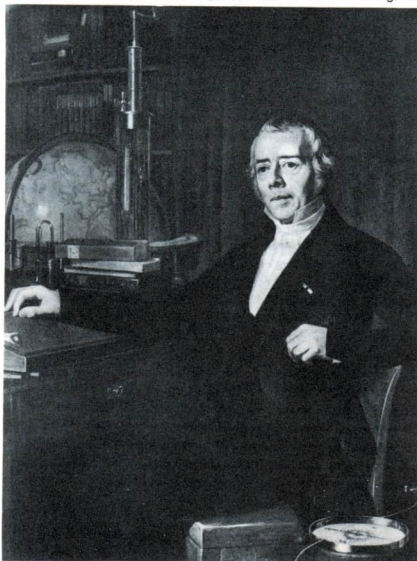
Elektrochemischer Telegraf von Sömmering

viele Drähte, und das Geben und Empfangen war doch recht umständlich. Dennoch bleibt Sömmering das große Verdienst, den galvanischen Strom, den elektrischen Gleichstrom, als erster in der Fernmeldetechnik verwendet zu haben.

## Wie hängt der Magnetismus mit der Elektrizität zusammen?

Mit dieser Frage beschäftigten sich die Physiker, seit sie um die Mitte des 17. Jh. beobachtet hatten, daß ein Blitz eine Magnetnadel entmagnetisierte und ein anderes Mal ummagnetisierte. Franklins Versuche, die gleiche Wirkung mit dem Entladungsfunken einer Batterie Leidener Flaschen zu erzielen, brachten keinen überzeugenden Erfolg. Aber man konnte an der großen Ähnlichkeit beider Erscheinungen – gleiche Polarität, Anziehung und Abstoßung und Fernwirkung – nicht vorbeigehen.

Man machte auch Versuche, magnetische Kräfte in der Volta-Säule nachzuweisen, und hängte zum Beispiel eine Säule waagrecht und beweglich an Seidenfäden auf. Sie sollte sich dann wie eine Magnetnadel in die Nord-Süd-Richtung einstellen. Der Erfolg mußte ausbleiben, weil man noch nicht begriffen hatte, daß der fließende Strom, der dynamische Vorgang im Gegensatz zur statischen Ladung, das



Hans-Christian Oersted

Neue und Wirkungsvolle war und dafür ein geschlossener Stromkreis an der Säule vorhanden sein mußte.

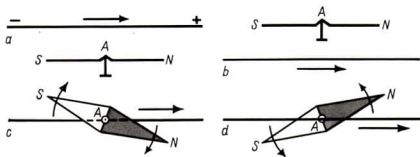
Dem dänischen Physiker HANS CHRISTIAN OERSTED (1777–1851) gelang es als erstem, die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes nachzuweisen. Er kam nicht zufällig, sondern durch systematisches Experimentieren auf seine außerordentlich wichtige Entdeckung. Schon 1812 hatte er vermutet, „daß die elektrischen Kräfte in einem von den Zuständen, wo sie sehr gebunden vorkommen, als Magnet einige Wirkungen auf den Magneten hervorbringen könnten.“

Oersted glaubte, wie die meisten Physiker seiner Zeit, daß in einem Draht, der eine Volta-Batterie kurzschloß, das positive Fluidum des Kupfers mit dem negativen des Zinks zusammenpralle und dadurch auch Wärme entstehe.

Bei einer seiner Vorlesungen in Kopenhagen schloß Oersted einen Platindraht kurz und ließ ihn aufglühen. Er war der Ansicht, daß der elektrische Strom – den er den „elektrischen Konflikt“ nannte – in einem glühenden Draht besonders wirksam sei. Da gerade eine Kompaßnadel zur Hand war, kam er auf den Gedanken, den Draht über die Nadel zu halten. Die Ablenkung war zu sehen, aber nur schwach. Da baute Oersted eine mächtige Batterie aus 20 Volta-Elementen auf, aber technisch etwas verändert: Jeder Becher bestand vollständig aus Kupfer und bildete so gleichzeitig den positiven Pol. Er hatte eine rechteckige Form; die breiten Seiten maßen je 12 Zoll mal 12 Zoll (etwa 30 cm mal 30 cm), die Schmalseiten und der Boden je 6,25 cm mal 30 cm. Von einer Seite aus ragten zwei Kupferstreifen bis über den nächsten Becher; auf diesen beiden Kupferstreifen lag ein Kupferstab mit einer quadratischen Zinkplatte von 10 Zoll, also etwa 25 cm Seitenlänge. Die Zinkplatte hing frei im Kupferbecher und berührte das Kupfer nicht. Die Becher wurden mit Wasser gefüllt, das mit  $\frac{1}{60}$  seines Gewichtes mit Schwefel-

säure und ebensoviel Salpetersäure versetzt worden war. Da die Platten sehr groß waren (die Zinkplatten je 625 cm<sup>2</sup>!), konnte Oersted der Batterie einen sehr starken Strom entnehmen.

Am 21. Juli 1820 führte er einen Draht parallel über eine Magnetnadel (Kompaßnadel) in Ruhestellung, also in Nord-Süd-Richtung, und schickte dann den starken Strom seiner Batterie durch den Draht. Die Nadel schlug stark aus!



Der elektrische Strom lenkt die Magnetnadel ab

Das war ein neuer geschichtlicher Augenblick für die Physik; wir werden noch erfahren, welche Folgen die Erkenntnis dieses Naturgesetzes hatte.

Oersted tat nun, was alle Forscher in solcher Lage tun: Er begann,

seine Entdeckung durch viele bestätigende (deduktive) Versuche zu sichern, zu beweisen, zu erweitern. Er wiederholte zunächst den Versuch mehrmals und stellte fest: Bei einem Abstand von etwa 3 Zentimetern zwischen Leiter und Magnetnadel bewegte sich diese um etwa  $45^\circ$ . Wurde der Abstand größer, so war die Abweichung der Nadel kleiner – und umgekehrt. Je stärker aber der Strom im Leiter war, um so stärker schlug die Nadel aus.

Damit hatte Oersted den Grundgedanken des Galvanometers gefunden und zugleich die Möglichkeit, die Stärke der von ihm erzeugten Ströme auf bessere, zuverlässigere und genauere Art zu erkennen als mit einem glühenden Platindraht. Der Bau der ersten Galvanometer ließ dann nicht lange auf sich warten.

Oersted hatte eindeutig beobachtet, daß nicht die Spannung, sondern die Stromstärke die Größe der Nadelausschläge bedingte, und schrieb: „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, hintereinandergeschaltet, wirken nicht stärker, sondern eher schwächer.“

Oersted erklärte diese Erscheinung 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 fünf Jahre später entdeckt wurde.

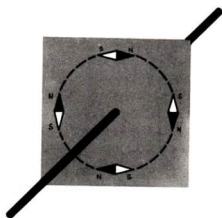
Lag nun der stromführende Draht über der Magnetnadel, und trat die negative Elektrizität über dem Südpol ein, so wurde der Nordpol nach Westen (und der Südpol nach Osten) abgelenkt. Lag der Leiter unterhalb der Nadel, so schlug diese nach der entgegengesetzten Richtung aus. Nicht nur für die waagrecht schwingenden Deklinationsnadeln (Kompaßnadeln), sondern auch für die in einer senkrechten Ebene schwingenden Inklinationsnadeln hatte Oersted die richtigen Ablenkregeln gefunden. Ampère formulierte Oersteds Ergebnis kurz danach mit seiner „Schwimmerregel“ etwa so: 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.

Oersted untersuchte auch verschiedene Werkstoffe und leitete den Strom in einer Glasröhre durch Drähte aus Platin, Gold, Silber, Messing, Eisen, Zinn, Blei und Quecksilber. „Die Natur des Metalles verändert den Erfolg nicht, es sei denn vielleicht in Hinsicht der Größe“, schrieb der Forscher am 21. Juli 1820. Er legte 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 erkannte: 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“, zum Beispiel Eisen.

Damit waren 1820 die drei wichtigsten Wirkungen des elektrischen Stromes bekannt: die chemische Wirkung, die Wärmewirkung und die magnetische Wirkung.

Oersted aber war noch längst nicht zufriedengestellt. Jetzt wollte er



Der „Konflikt im Kreise“



genau wissen, in welcher Form sich die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes (er sagte nach wie vor: Konflikt) äußert. Zur Abwechslung stellte er einen Draht senkrecht auf und schickte einen starken Strom hindurch. Da wurde etwas sehr Merkwürdiges deutlich: Niemals wurde eine Magnethaare vom Draht selbst angezogen, so daß eine Spitze etwa auf den Draht zeigte oder gar an ihm haften blieb wie an einem natürlichen Magneten. „Es läßt sich auch aus dem, was beobachtet wurde, schließen, daß dieser Konflikt im Kreise fortgehe“, schrieb Oersted. Er hatte das Neue, das an nichts Bekanntes geknüpft werden konnte, richtig erkannt: Der Mittelpunkt der magnetischen Kraft, der stromdurchflossene Draht, wirkt nicht anziehend oder abstoßend auf magnetische Pole, sondern er treibt diese Pole im Kreise um sich herum. Die nächste Erkenntnis, den Übergang von der magnetischen Fernwirkung zum Magnetfeld, fand nicht viel später Faraday.

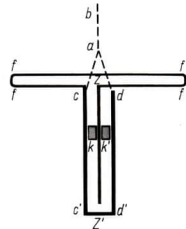
Oersted wies weiterhin nach, daß der Grundsatz von Wirkung und Gegenwirkung auch bei seinen Versuchen galt: Er prüfte die Wirkung eines festen Magneten auf einen beweglichen Stromleiter. Zu diesem Zweck baute er eine Drahtschleife mit Batterie und hängte das Ganze an Fäden auf. Er beschrieb die Anordnung so: „cc'dd' ist ein mit angesäuertem Wasser gefüllter Kasten aus möglichst dünnem Kupferblech von  $\frac{1}{2}$  Zoll Breite, 3 Zoll Höhe und 4 Zoll Länge, welche letztgenannte Dimension sich senkrecht in die Zeichenebene hinein erstreckt. ZZ' ist ein dünnes Zinkblech, welches durch zwei Korke k und k' in der Mitte des Kupferkastens gehalten wird. cfffff ist ein Messingdraht, der mit seinen Enden an der Kupferwand oder an der Zinkplatte befestigt ist und den Strom von c über ffff nach Z leitet; ba ist ein möglichst dünner Torsionsdraht aus Messing; ac und ad sind zwei Hanffäden.“ 1 Zoll können wir mit 2,5 cm ansetzen.

Leider war dieser Aufbau zu schwerfällig, zu wenig beweglich; die Drahtschleife war zudem an den Seiten viel zu kurz. So erreichte Oersted nicht, daß sich die stromdurchflossene Schleife wie eine Magnethaare in die Nord-Süd-Richtung einstellte.

Einen großen Erfolg erzielte Oersted jedoch, als er einen starken Magneten an eine Seite seiner Drahtschleife brachte: Die Schleife bewegte sich! Das war eine grundlegende Entdeckung: Ein fest stehendes Magnetfeld setzt einen stromdurchflossenen Leiter in Bewegung. Wir sprechen hier vom 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. Oersted hatte aber auch das „eisenfreie“ Magnetfeld entdeckt, das magnetische Feld, das jeden stromdurchflossenen elektrischen Leiter umgibt.

Oersted machte eine der wichtigsten physikalischen Entdeckungen: Er verband als erster die Elektrodynamik mit dem ganzen Bereich des Magnetismus.

JOHANN SALOMON CHRISTOPH SCHWEIGGER (1779–1857), Professor der Physik und Chemie in Erlangen und Halle, ergänzte Oersteds Arbeiten durch die Erfindung des „Multiplikators“ (Verstärkers). Er verstärkte die magnetische Kraft des stromdurchflossenen Drahtes, indem er diesen (mit Seide und Wachs isoliert) zu einer



Die bewegliche Drahtschleife



Der Multiplikator

länglichen offenen Spule aufwickelte. Eine in dieser Spule hängende Magnetnadel sprach schon auf sehr kleine Stromstärken an; das Ganze war ein recht empfindliches Galvanoskop.

Der französische Physiker DOMINIQUE FRANÇOIS ARAGO (1786–1853) erkannte, angeregt durch Oersteds Arbeiten, bei gemeinsamen Versuchen mit Gay-Lussac, daß der elektrische Strom Magnete nicht nur ablenken, sondern sie auch herstellen kann: Eine Stahl-nadel wird in einer stromdurchflossenen Drahtwendel magnetisch und bleibt es. Der Draht – auch einer aus Messing oder Kupfer – zieht Eisenfeilspäne an und stellt sie senkrecht zu seiner Richtung.

Als Aragoschen Versuch bezeichnet man heute den Nachweis, daß eine umlaufende Kupferscheibe eine darüberhängende Magnetnadel in gleicher Drehrichtung mit umlaufen läßt; ferner, daß eine schwingende Magnetnadel schnell zur Ruhe kommt, wenn man einen Kupferklotz in ihre Nähe bringt. Die Erklärung dafür ist: In dem massiven Metall entstehen, wenn es sich relativ zu einem magnetischen Feld bewegt, elektrische Wirbelströme. Sie wirken stets entgegengesetzt zur hervorru-fenden Bewegung und daher als Bremse. Nach diesem Grundsatz arbeiten Wirbelstrombremsen. Bei Eisenkernen aller Art in Motoren, Spannungserzeugern, Umspannern usw. ist der Wirbelstrom lästig, weil er einen Teil der elektrischen Energie in Wärme verwandelt und dadurch den Wirkungsgrad der



Dominique François Arago



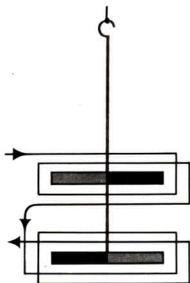
André Marie Ampère

Maschine herabsetzt; er wird daher durch Aufteilen der Kerne in isolierte dünne Bleche so weit wie möglich vermindert.

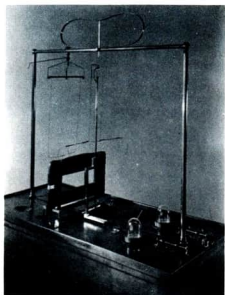
Gemeinsam mit Ampère bearbeitete Arago 1826 Fragen des Elektromagnetismus. Die größten Leistungen Aragos liegen jedoch auf dem Gebiet der Optik. Er entdeckte 1811 die chromatische Polarisation und baute ein Polarisoskop. Zusammen mit seinem Freunde AUGUSTIN-JEAN FRESNEL (1788–1827) untersuchte er die Erscheinungen des polarisierten Lichtes und bestimmte die Brechungszahlen verschiedener Gase. Arago festigte die Wellenvorstellung vom Licht und gab eine Anleitung zum Messen der Lichtgeschwindigkeit. Alexander von Humboldt sagte von ihm: Er ist das beste Herz und der stärkste Kopf dieser Zeit.

ANDRÉ MARIE AMPÈRE (1775–1836) war der erfolgreichste von allen Forschern, die Oersteds Arbeiten weiterführten. Durch seine systematischen Versuche begründete er die heutige Elektrodynamik; er hat außerdem zwei wichtige Forschungen eingeleitet: die des Erdmagnetismus und die des Elektromagnetismus mit all ihren technischen Anwendungen. Erstaunlicherweise hat er die wichtigsten Ergebnisse 1820 in etwa sieben Wochen gefunden und der Pariser Akademie mit Experimenten vorgetragen. Er prägte die Begriffe „elektrische Spannung“ und „elektrischer Strom“ – auf diese verschiedene Weise äußerte sich die elektromotorische Wirksamkeit. Er schlug vor, die Richtung der strömenden positiven Elektrizität als Strom zu bezeichnen – vom Kupfer zum Zink, vom Sauerstoffdraht zum Wasserstoffdraht in der Elektrolyse.

Das war der einzige Fehler, den Ampère machte. Wußte er von den Ritterschen Versuchen, bei denen sich die Kupferteilchen vom Kupfer zum Zink bewegt hatten? Er konnte noch nichts von Elektronen und



Galvanometer mit astatischem Nadelpaar



Ampères magnetisches Gestell

lonen wissen – und daß es nur eine negative Elektrizität gibt, die in entgegengesetzter Richtung fließt. Aber beinahe wäre er auch theoretisch der Wirklichkeit ein großes Stück nähergekommen...

Ampère hat ein Galvanometer gebaut und es auch so genannt. Um die Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel zu vergrößern, verkleinerte er folgerichtig den Einfluß des Erdmagnetismus auf einfache Weise: Er verband zwei entgegengesetzt gerichtete Kompaßnadeln mit einem unmagnetischen Verbindungsstäbchen und hängte an diesem beide Nadeln beweglich auf. Der stromführende Draht zwischen beiden wirkte nun im selben Drehsinne auf beide Nadeln; die Wirkung war verdoppelt. Ampère hatte damit das astatische Nadelpaar erfunden; in seinem Galvanometer hat er es aber nicht benutzt.

Ampères wichtigste Entdeckung war, daß man ohne Magnete, nur mit stromdurchflossenen Drähten und auch mit „Gewinden“ (Drahtwendeln und -spulen), die er „Solenoid“ nannte, magnetische Versuche machen konnte. Zumeist brachte er einen beweglichen Draht (mit Stromzuführung durch Näpfchen mit Quecksilber) neben einem festen an und beobachtete: Die beiden parallelen Ströme ziehen einander bei gleicher Richtung an und stoßen einander bei entgegengesetzter Richtung ab. Das war Ampères grundlegende Erkenntnis, die er in vielfachen Abänderungen im Aufbau seiner Geräte und Experimente systematisch, auch messend, untersucht hat.

Der Erdmagnetismus, so meinte Ampère, sei auf viele in sich geschlossene elektrische Ströme in der Erdkugel zurückzuführen, die so zusammenwirkten wie ein großer, von Ost nach West um die ganze Erde fließender Strom; er wirke aber nach außen nicht als elektrischer Strom, sondern durch seinen Magnetismus. Entstanden sei der Strom auf galvanische Art, weil die verschiedenen Stoffe in der Erde einander berührten und dadurch galvanische Elemente bildeten.

So faßte Ampère auch die Ursache aller magnetischen Erscheinungen auf der Erde auf – als „Partikelströme“, elektrische Ströme, die in den Partikeln des Eisens kreisen. (Wir sagen heute: Molekularströme!) Er hatte sich also bereits von der Vorstellung des magnetischen Fluidums gelöst.

Ampère, den Maxwell später den „Newton der Elektrizität“ nannte und mit dessen Namen heute die Einheit der elektrischen Stromstärke bezeichnet wird, starb arm und vergessen.

## Das Grundgesetz des elektrischen Stromes wird gefunden

Der Lehrer GEORG SIMON OHM (1787–1854) fand 1826 das nach ihm benannte Gesetz, das die Beziehungen zwischen Spannung, Stromstärke und Leitungswiderstand bei gleichbleibender Temperatur im geschlossenen Stromkreis zeigt. Es lautet für Gleichstrom  $U = I \cdot R$ . Dabei ist der Quotient von  $U$  und  $I$ , der Widerstand  $R$ , nur von Länge, Querschnitt und Material (den Eigenschaften) und von der Temperatur des Leiters abhängig, jedoch unabhängig von der Stromstärke und von der Spannung zwischen den Leiterenden. Schon Ritter hatte beobachtet, daß die verschiedenen Metalle den Strom verschieden gut leiten; da er noch kein geeignetes Meßgerät

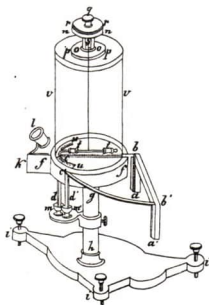


Georg Simon Ohm

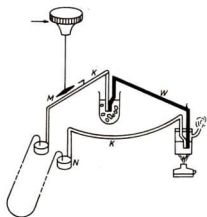
hatte, konnte er die Leitfähigkeit nicht messen. Davy meinte mit Recht, ein Leiter erwärme sich um so schneller, je schlechter er den Strom leite, und maß die Geschwindigkeit der Erwärmung. Dabei kam er auf folgende Reihe der größten bis zur kleinsten Leitfähigkeit: Silber, Kupfer, Blei, Gold, Zinn, Platin, Eisen.

Ohm benutzte zum Messen der Spannung ein Elektroskop mit Kondensator und zum Messen der Stromstärke ein Torsions-Galvanometer in der Form einer 16 cm hohen und 11 cm weiten Drehwaage. Dabei setzte er voraus, daß die etwa 5 cm lange Magnetnadel verhältnismäßig zur Stromstärke ausschlug. Er hat aber nicht einfach den Ausschlag der Nadel gemessen, sondern die an einem bandartigen Goldblattstreifen hängende Nadel durch Drehen des Knopfes, an dem der Streifen hing, bei jeder Messung auf die Nullstellung zurückgebracht. Das beobachtete er auch mit einer Lupe. Gemessen hat er dann den Verdrehungswinkel (Torsionswinkel) am Drehknopf, der jeweils beim Rückstellen auf Null auftrat. Ein scheinbar umständliches Verfahren – aber es war genauer als das unmittelbare Ablesen der Nadelausschläge.

Das anfangs benutzte Volta-Element erwies sich – obwohl ziemlich großflächig – als unzuverlässig und von der Stärke des entnommenen Stromes abhängig. Ohm benutzte statt dessen ein Thermoelement aus Kupfer und Wismut. Er lötete an die Enden eines Wismutbügels je einen Kupferbügel; die eine Lötstelle tauchte er in Eiswasser, die andere in siedendes Wasser. Der eine Kupferbügel war zugleich der stromführende Draht des Galvanometers. Zwischen beide



Ohms Drehwaage



Ohms Thermoström-Anordnung

Kupferbügel schaltete Ohm mit Hilfe zweier Näpfchen mit Quecksilber nacheinander die zu untersuchenden Drähte.

Wie Ohm zu seinen Ergebnissen kam, kann man durch folgende Gleichung darstellen:

$$X = \frac{a}{b + x};$$

dabei bedeutet a die gleichbleibende „erregende Kraft“ (die Spannung) des Elementes, b die Widerstände der fest eingebauten Leitungen aus Kupfer und Wismut, und x den Widerstand des zu untersuchenden Drahtstückes. b und x wurden als Länge gemessen; ein Zoll war die Widerstandseinheit. Bei m hintereinander (in Reihe) geschalteten Elementen mit der Einzelspannung a erkannte Ohm die Gesamtspannung gleich m · a und den Gesamtwert von m hintereinander geschalteten Widerständen b gleich m · b. Bei seinen weiteren Versuchen mit Volta-Elementen begriff er, daß auch der innere Widerstand dieser Elemente mit zum Widerstand des Stromkreises gezählt werden müsse. Um diesen inneren Widerstand zu verringern, kam er auf den Gedanken, die Elemente nebeneinander (parallel) zu schalten. Auch Stromverzweigungen hat Ohm untersucht und mit alledem die Grundlagen für die Kirchhoffschen Regeln gelegt.

Ohm hatte bemerkt, daß man nicht beliebig viele Volta-Elemente hintereinanderschalten konnte, um sehr hohe Spannungen zu erhalten; der innere Widerstand wuchs mit und wurde zu groß. Er wußte auch, daß man die Empfindlichkeit des Schweiggerschen Multiplikators nicht beliebig durch mehr Windungen steigern konnte; der elektrische Widerstand wuchs mit der Windungszahl.

Bei seinen Messungen erhielt Ohm folgende Reihe von Metallen mit abnehmender Leitfähigkeit: Kupfer, Gold, Silber (vermutlich unrein, daher erst an dieser Stelle), Zink, Messing, Eisen, Platin, Zinn, Blei; Kupfer leitete 10,5mal so gut wie Blei. Ohm bestätigte das schon von Davy gefundene Gesetz, daß die Leitfähigkeit der Metalle bei steigender Temperatur abnimmt.

Er hat seine Untersuchungen 1827 in seinem Werk „Die galvanische Kette“ veröffentlicht und auch schon den Begriff „Gefälle“ benutzt als die Spannungsdifferenz an zwei um eine Längeneinheit voneinander entfernten Punkten. Bei demselben Leiter sei das Gefälle überall gleich, bei verschiedenen sei es den Widerständen verhältnismäßig. Er nannte auch „reduzierte“ Längen; das sind auf den Querschnitt 1 umgerechnete Drahtlängen für Widerstände. Damit hat er die Arbeiten von Wheatstone und anderen vorbereitet.

Die große Leistung Ohms ist in seiner Experimentierkunst, in der Klarheit seiner Aussagen begründet. Vieles ist nur von wenigen Zeitgenossen Ohms verstanden und erst Jahre später voll gewürdigt und ausgewertet worden.

## Die letzten großen Entdeckungen der klassischen Elektrizitätslehre

MICHAEL FARADAY (1791–1867) hat mit seinen großartigen Experimenten die Erforschung der klassischen Elektrizitätslehre gekrönt und abgeschlossen; er hat zugleich die Voraussetzung für die Entwicklung der Wechselstromtechnik geschaffen und die Bezie-





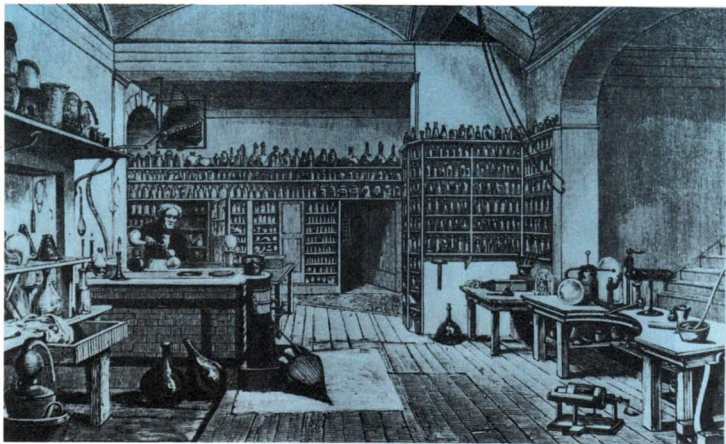
Michael Faraday

hungen zwischen den elektrischen Erscheinungen und dem anderen Naturgeschehen aufgedeckt.

Der Engländer Faraday, einer der ganz Großen der Wissenschaft, wurde 1791 als Sohn eines Dorfschmiedes in der Nähe von London geboren. Seine hervorragenden Eigenschaften waren die Sicherheit und Unbeirrbarkeit, mit der er sein Leben führte; die ruhige Gleichmäßigkeit seiner Arbeit, die Zuverlässigkeit und die Offenheit seiner Sinne und seines Herzens machten einen wesentlichen Teil seiner Persönlichkeit aus.

Von äußeren Dingen, wie gesellschaftlichen Veranstaltungen, Ehrenämtern und dergleichen, wollte Faraday nichts wissen. Er hat es später sogar abgelehnt, geadelt und zum Präsidenten der Royal Society, der englischen Akademie der Wissenschaften, gewählt zu werden. Nur die Wissenschaft galt ihm etwas.

In der Schule lernte Faraday nicht sonderlich viel – Lesen, Schreiben und ein wenig Rechnen. Mit dreizehn Jahren mußte er schon mitverdienen; er wurde Laufbursche in einer Papierhandlung. Ein Jahr später gab ihn sein Vater in die Lehre zu einem Buchbinder und Buchhändler – und damit war Faraday in das Kraftfeld der Wissenschaft geraten, die ihn sein Leben lang gefesselt hat. Er verschlang geradezu die damaligen populärwissenschaftlichen Bücher, vor allem die über Chemie und Elektrizität. Sein Wissen wuchs zunächst mehr in die Breite als in die Tiefe; er wollte alles in sich aufnehmen und tat das auch.



Faraday in seinem Laboratorium

Faraday hatte geradezu einen „sechsten Sinn“ für die naturwissenschaftlichen Probleme, die in der Luft lagen, und sah eine gesuchte Lösung bald in Gedanken vor sich. „Es könnte vielleicht so sein“; pflegte er dann zu sagen, „versuche es!“ Und dann experimentierte er.

Als man Faraday viel später einmal eine Auszeichnung überreichte, sagte er in seiner Dankrede unter anderem: „Sie dürfen mich nicht für einen großen Denker oder für einen frühreifen Menschen halten. Ich war von Natur aus eher lebhaft und phantasievoll und konnte an die „Märchen aus 1001 Nacht“ ebenso leicht glauben wie an die Angaben einer Enzyklopädie.“

Faraday besuchte als Geselle die Vorlesungen des englischen Chemikers Humphry Davy, des Begründers der Elektrochemie, und war begeistert. Er experimentierte mit selbstgebastelten Geräten und wurde mit Davy bekannt; bald danach wurde er dessen Mitarbeiter und später sogar Nachfolger.

Faraday war ein Einzelgänger. Er war glücklich, wenn er experimentieren konnte; er hat es darin zu einer wahren Meisterschaft gebracht. Er hat viel über seine chemischen und physikalischen Versuche geschrieben – ohne auch nur eine einzige algebraische und chemische Gleichung zu verwenden. Dennoch wurden Faradays Schriften zu höchst wertvollen, wissenschaftlichen Quellen. Sie sind mit großem pädagogischem Geschick, oft mit geradezu liebevoller Vertiefung in die Einzelheiten geschrieben. Ein Musterbeispiel dafür ist seine kleine populärwissenschaftliche Schrift „Naturgeschichte einer Kerze“; sie zeigt die große Fähigkeit Faradays, Naturerscheinungen beobachten zu können.

Faraday hatte selbst erlebt, wie schwer es ist, sich Wissen ohne An-

leitung durch Lehrer aneignen zu müssen. Wohl auch aus diesem Grunde tat er alles nur Mögliche, um anderen den Weg leichter zu machen. Er hat viele Jahre hindurch naturwissenschaftliche Vorträge für Jugendliche gehalten.

Davy nahm 1813 seinen neuen Assistenten Faraday mit auf eine große Reise nach dem Kontinent, um wissenschaftliche Verbindungen zu knüpfen und zu festigen. Die Schweiz, Frankreich, Deutschland und Italien wurden besucht. Faraday machte dabei viele wertvolle Bekanntschaften, darunter mit Ampère, Arago, Gay-Lussac, Thompson und Volta.

1821 wurde Faraday Oberaufseher der Laboratorien der Royal Institution. Sein Aufstieg war nicht aufzuhalten – obwohl Davy plötzlich eifersüchtig auf Faradays Erfolge wurde und, allerdings erfolglos, gegen dessen Aufnahme in die Royal Society stimmte. 1825 wurde Faraday Laboratoriumsdirektor, 1827 wurde ihm die Professur für Chemie angeboten. Später wählte ihn die französische Akademie der Wissenschaften zu einem ihrer acht ausländischen Ehrenmitglieder.

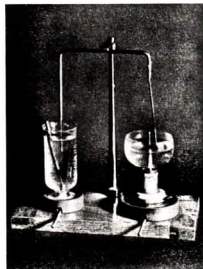
Die ersten Arbeiten Faradays lagen auf dem Gebiet der Chemie. Er veredelte Stahl durch Legieren mit Nickel, Titan, Silber und Platin, entdeckte das Benzol und verflüssigte Chlorgas durch Druck (1823). Als Chemiker und zugleich Physiker erkannte er die Quelle der Elektrizität des Volta-Elements in chemischen Vorgängen. Er schrieb 1840 (zwei Jahre, bevor Robert Mayer das Prinzip von der Erhaltung der Energie verkündete): „... auf diese Weise können wir chemische Kräfte in einen elektrischen Strom oder diesen in chemische Kraft verwandeln... Allein in keinem Fall, nicht einmal beim elektrischen Aal oder Rochen, wird Kraft erschaffen oder erzeugt, ohne daß etwas anderes verbraucht wird.“

Faraday führte 1833 die Elektrolyse von Wasser mit Elektroden aus Holzkohle durch; die Abscheidung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$  an der Anode erkannte er schon als Oxydation der Holzkohle durch den entstehenden Sauerstoff.

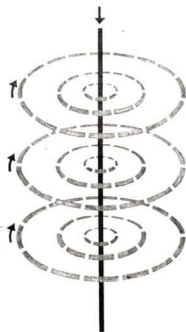
Seine größten Leistungen liegen jedoch im Bereich der Elektrizität. Hier hat er im Anschluß an Oersted, Ampère und Ohm so viel Neues gefunden, daß man im vorigen Jahrhundert den Eindruck haben konnte, er habe auch die letzten noch offenen Fragen seiner Arbeitsgebiete gelöst. Aber Faraday mußte seiner Natur entsprechend die sichtbaren Dinge anders sehen und sich die unsichtbaren anders vorstellen als beispielsweise der – im Gegensatz zu Faraday – mathematisch gebildete Ampère, der sich eine Wirkung der Elektrizität und des Magnetismus in die Ferne auch ohne Medium ohne weiteres vorstellen konnte.

Das konnte Faraday nicht. Er sah vielmehr den ganzen Raum durchzogen von elektrischen und magnetischen Kraftlinien, die Spannungen hatten – etwa wie ein elastischer Körper, er sah die Ladungen als Veränderungen der Kraftlinien. Damit hat sich Faraday von den einfachen Fernwirkungen der Anziehung und Abstoßung gelöst und ist zur ersten Feldtheorie vorgestoßen. James Clerk Maxwell hat ihr die endgültige mathematische Form gegeben.

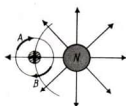
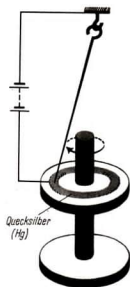
Faraday bewies 1821 durch Experimente, daß, wie er in seinen Tagebüchern schrieb, „alle gewöhnlichen Anziehungen und Abstoßungen der Magneten durch den leitenden Draht Täuschungen sind, daß die Bewegung nicht Anziehung und Abstoßung und nicht auf die



Faradays elektrischer Urmotor



Magnetische Feldlinien



Faradays Unipolarmotor

Wirkung irgendwelcher anziehender oder abstoßender Kräfte zurückzuführen ist, sondern durch eine Kraft im Draht bewirkt wird, die sich bemüht, die Magnetonadel 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 zur Drehung um den Draht."

Damit hatte Faraday das Prinzip des Elektromotors entdeckt, mit Gleichstrom aus einer Volta-Batterie betrieben, durch die kreisenden magnetischen Feldlinien in Bewegung gesetzt und gehalten: einen Unipolarmotor, denn in seiner Mitte ist nur einer der beiden Magnetpole wirksam. Kraft abgeben konnte dieser Motor nicht; er war ein physikalisches Gerät und keine technische Maschine.

Faraday hatte nicht nur entdeckt, sondern auch bewiesen: Die magnetische Kraft eines stromdurchflossenen Leiters geht nicht senkrecht vom Leiter aus, sondern läuft in geschlossenen Kreisen um den Leiter als Mittelpunkt herum. Das sind Faradays „lines of force“, die „magnetischen Linien“ oder Kraftlinien; wir sagen heute Feldlinien.

## Die Physik der Fernwirkung wird zur Feldphysik

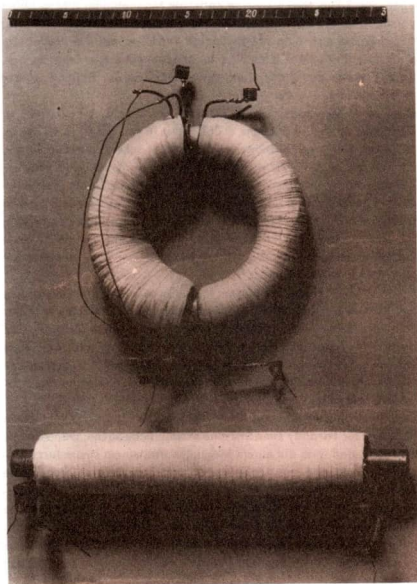
Allgemein bekannt ist Faradays berühmte Entdeckung der elektromagnetischen Induktion.

Faraday kannte nicht nur die bisher beobachtete Erscheinung der Influenz, auch Induktion genannt, er kannte die Versuche Aragos und Ampères, beispielsweise den „Rotationsmagnetismus“ der umlaufenden Kupferscheibe mit dem mitlaufenden Kompaß; er hatte auch auf Grund seiner eigenen Erfahrungen ein sicheres Gefühl für die Dialektik des Naturgeschehens. Er sagte sich: Mit der Elektrizität läßt sich leicht Magnetismus erzeugen. Wie steht es umgekehrt? „Verwandlung von Magnetismus in Elektrizität“ schrieb er 1822 unter eine Reihe von Notizen über Ideen für zukünftige Versuche in sein Tagebuch. 1825 fand er endlich die Zeit, sich diesen Versuchen zu widmen.

Faraday dachte so: Wenn zwei Metallplatten einander dicht gegenüberstehen und ich die eine negativ auflade, so wird die andere durch die Influenz sofort positiv geladen; das ist aus der Ladungselektrizität bekannt. Ob man nicht etwas Entsprechendes mit der strömenden Elektrizität aus der Volta-Batterie machen kann? Man legt zwei Drähte nebeneinander, schickt durch den einen Draht Strom und schaut, was sich im zweiten Draht tut; den verbindet man mit einem Galvanometer, das jeden Strom sofort anzeigen muß.

Faraday versuchte es zunächst mit zwei etwa 1,25 m langen Drähten, die er dicht nebeneinanderlegte: das Galvanometer blieb bewegungslos. Er wickelte nun beide Drähte, durch einen Zwirnsfaden getrennt (isolierte Drähte gab es noch immer nicht!) auf eine Papprolle und schaltete: Wieder blieb der Galvanometerzeiger ruhig stehen. In sein Tagebuch trug er am 28. November 1825 ein: „Versuche über Induktion durch den Verbindungsdraht einer Volta-Batterie. Vier

Tröge, jeder zu 10 Plattenpaaren, werden zu einer Batterie nebeneinandergeschaltet. Versuch I. Die Pole werden durch einen etwa 4 Fuß langen Draht verbunden, zu dem parallel ein ähnlicher Draht läuft, der von ihm nur durch 2 Papierdicken getrennt ist. Die Enden des letztgenannten Drahtes, verbunden mit einem Galvanometer, zeigen keinen Effekt.“ Faraday wickelte die beiden Drähte in zwei Lagen, durch Kalikostreifen getrennt, übereinander: Wieder kein Erfolg. Diese erste Hypothese der Induktion, der Übertragung strömender Elektrizität durch Influenz von einem Stromkreis auf einen anderen, war offensichtlich falsch. Dabei wäre der Versuch gelungen, wenn Faraday wesentlich längere Drähte genommen hätte, nicht nur 4 Fuß lang (= 1,25 m). Vielleicht hat es beim Ein- und Ausschalten sogar einen kleinen Ausschlag am Galvanometer gegeben (nur dann wäre er möglich gewesen); aber Faraday hatte, befangen in seiner Influenz-Hypothese, nur auf einen Dauerausschlag geachtet. Faraday ließ daraufhin die unbrauchbare Hypothese fallen. Einige Jahre vergingen mit anderen, vorwiegend chemischen Arbeiten. Erst 1831 kam Faraday auf seine Induktionsversuche zurück, jetzt aber auf der richtigen Grundlage des Magnetismus. Faraday baute eine Anordnung, die er in seinem Tagebuch am 29. August 1831 folgendermaßen beschreibt:



Die Spulen zu Faradays Induktionsversuch

„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 Eisen Draht, deren Länge zusammen etwa 60 Fuß betrug, im gleichen Sinne wie zuvor gewickelt; diese Seite sei B...

Drahtspulen von Faraday



Ich lud eine Batterie von 10 Paar Platten, je 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 Magnetnadel 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."

Dazu muß man wissen: 1 Zoll (inch) = 2,54 cm, 1 Fuß (foot) = 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 her schwingen. Die Seite A nennen wir heute die Primärspule, die Seite B die Sekundärspule.

Faraday hatte mit diesem Gerät den ersten Umspanner (Transformator) gebaut und damit die physikalische Voraussetzung für den Aufbau eines großen Industriezweiges geschaffen. Die Versorgung mit elektrischer Energie, aber auch die Fernmeldetechnik ist ohne Umspanner und ohne die auf derselben Grundlage arbeitenden Übertrager nicht denkbar.

Faraday beobachtete bei diesem Induktionsversuch und den folgenden Versuchen, daß beim Schließen des Primär-Stromkreises in der Sekundär-Spule ein Stromstoß in der entgegengesetzten Richtung und beim Öffnen ein Stromstoß in der gleichen Richtung wie im Primär-Stromkreis entstand. An Stelle der einfachen Magnetnadel 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 Oerstedschen Versuch und schließlich daran, daß er selbst die erste umlaufende Bewegung eines Stromleiters erreicht hatte. Bewegung – das müßte die Lösung sein! Aus mechanischer Bewegung und Magnetismus mußte man elektrischen Strom erzeugen!



Faraday wickelte eine Drehspule auf einen Eisenstab; die Spulenden verband er mit seinem Galvanometer. Magnetisierte er den Eisenstab schnell, indem er einen Hufeisenmagneten anlegte, so zeigte das Meßgerät einen Ausschlag nach einer Seite; nahm Faraday den Magneten schnell fort, gab es einen Ausschlag nach der anderen Seite.

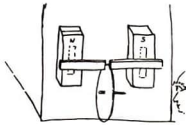
Für den nächsten Versuch umwickelte Faraday einen sehr starken Dauermagneten seines Institutes (er bestand aus 450 einzelnen Stabmagneten und konnte 100 englische Pfund tragen) mit einer Spule. Das angeschlossene Galvanometer zeigte die gleichen Ausschläge, nur diesmal stärker, sobald er einen Anker schlagartig an den Magneten ansetzte und ihn wieder abriß. Ohne und bei ruhendem Anker schlug das Galvanometer nicht aus. Faraday erhielt dann den Induktionsstrom bereits beim Nähern und Entfernen des Ankers, ohne daß dieser den Magneten berührte; bei wachsender Entfernung wurden die Ausschläge jedoch kleiner.

Nun nahm Faraday eine Spule – Schraubendraht nannte er sie – ohne Eisenkern und verband die Drahtenden wieder mit seinem Galvanometer. Er holte sich einen Stabmagneten von  $\frac{3}{4}$  Zoll (= 1,9 cm) Durchmesser und 8,5 Zoll (= 21,6 cm) Länge, und was damit geschah, schildert er wie folgt: „Dieser Magnet wurde mit einem Ende in die Achse des Schraubendrahtes gestellt und, nachdem die Galvanometernadel zur Ruhe gekommen war, plötzlich hineingeschoben. Augenblicklich wich die Nadel ab... blieb der Magnet drin, so nahm die Nadel wiederum ihre erste Stellung an; wurde er herausgezogen, so wich sie in entgegengesetzter Richtung ab.“

An diesem Tage, dem 17. Oktober 1831, hat Faraday das elektrodynamische Prinzip entdeckt, nach dem alle Spannungserzeuger (Generatoren) arbeiten. Das war eine der größten Leistungen in der Geschichte der Menschheit. Nun setzte die große Entwicklung der Starkstromtechnik ein. Rückwirkend wurde auch die Entwicklung der Fernmeldetechnik entscheidend gefördert; die Lichttechnik und viele andere technische Bereiche wurzeln in dieser Faradayschen Entdeckung, in diesem wichtigen Naturgesetz.

Das Neue und so Bedeutsame von Faradays Entdeckung war: In einer Drahtspule, die ein Teil des 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 sich die 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 an; sich bewegend, müssen die Feldlinien die Spule „schneiden“. Durchziehen sie ruhend die Spule, so entsteht in dieser kein Strom.

Im Falle der beiden Spulen sprechen wir von der elektromagnetischen Induktion, beim Umspanner ausgenutzt; bei dem sich mechanisch vor der Spule bewegenden Magnet-Kraftfeld finden wir das



Faraday experimentiert  
mit Aragos Kupferscheibe

elektrodynamische Prinzip, angewendet in den heutigen Spannungserzeugern (Generatoren, Dynamomaschinen). Die Relativbewegung ist gewahrt; mehrere Magnete und mehrere Spulen verstärken und verbessern die Wirkung eines Magneten und einer Spule.

Faraday erkannte, daß man mit der elektromagnetischen Induktion keinen gleichmäßigen Dauerstrom (Gleichstrom), sondern nur Stromstöße, Stromimpulse erhalten kann. Er wußte, die Stärke des in einem Leiter induktiv erzeugten Stromes entspricht der Anzahl der magnetischen Feldlinien, die den Leiter in der Zeiteinheit „schneiden“. Er beobachtete, daß die Stromrichtung in der Sekundärspule wechselt; damit hat er den ersten Wechselstrom erzeugt. Faraday erkannte auch: Die in der Primärspule entstehenden und vergehenden Feldlinien „schneiden“ zwangsläufig auch die Windungen der eigenen Primärspule und erzeugen in ihr den „Selbstinduktionsstrom“. Beim Einschalten ist der Sekundärstrom entgegen gesetzt gerichtet; der Primärstrom wird dadurch geschwächt. Das ist in der Elektrotechnik ein meist unerwünschter, aber unvermeidbarer Verlust.

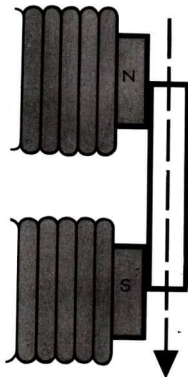
Faraday hatte außerdem erkannt, daß in der Sekundärspule zunächst eine Sekundärspannung entsteht; erst wenn der Sekundärstromkreis – zum Beispiel durch das angeschaltete Galvanometer – geschlossen ist, entsteht nach dem Ohmschen Gesetz auch ein Sekundärstrom.

Noch eine Frage ließ Faraday keine Ruhe: Aragos Kupferscheibe mit der mitlaufenden Magnetnadel. Er erklärte diese Erscheinung des Wirbelstromes durch Induktionswirkung der Magnetnadel auf die relativ zu ihr bewegte Kupferscheibe. Um das noch besser beobachten zu können, ließ Faraday eine runde Kupferscheibe zwischen den Polscheiben eines starken Magneten umlaufen. Den dabei in der Kupferscheibe entstehenden Induktionsstrom nahm er durch zwei Schleiffedern ab, die eine an der Scheibenachse, die andere am Rande der Scheibe. Dabei verband er die Schleifen mit seinem empfindlichen Galvanometer (mit astatischem Nadelpaar, in einer Glasglocke vor Luftzug geschützt). Es zeigte bei schnellaufender Scheibe einen Daueranschlag von 90°! Das bedeutete, hier wurde zum ersten Male durch Magnetinduktion ein Dauerstrom, Gleichstrom, erzeugt. Nach dem ersten Elektromotor, dem Unipolarmotor, hatte Faraday nun auch das Prinzip des ersten Spannungserzeugers gefunden.

Auch der Faradaysche Käfig, von Franklin vorausgeahnt, ist ein Begriff geworden: ein Raum, der vollständig von einem Maschen drahtnetz umschlossen und dadurch gegen magnetische Wechselfelder und elektrische Felder abgeschirmt wird. Er wurde bis vor kurzem in der Medizin bei der Aufnahme von Kardiogrammen (Aufzeichnung der Herztätigkeit) verwendet; in der elektrischen Meßtechnik spielt er weiterhin eine Rolle.

Die Entdeckung der Induktion ließ den Strom der Physik-Entwicklung riesengroß werden. Sie war eine der größten menschlichen Leistungen.

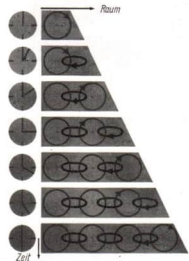
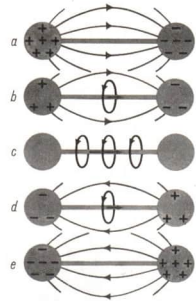
Davy nannte Faraday später seine „schönste Entdeckung“, und der französische Chemiker Jean-Baptiste Dumas würdigte Faradays Genie als Denker und Forscher in seiner Gedächtnisrede vor der Französischen Akademie der Wissenschaften am 18. Mai 1868 unter



Faradayscher Effekt

anderen mit folgenden Worten:

„Faraday hatte eine Methode, die mit bestem Gewissen empfohlen werden kann. Sein Glauben an die hohe Berufung des Menschen und die Überzeugung, daß es ihm vorgeschrieben ist, sich unaufhörlich dem Licht zu nähern, gab seinen wissenschaftlichen Forschungen den Charakter einer heiligen Mission. Er betrachtete das Experiment als das sicherste Mittel, die Wahrheiten zu entdecken oder zu beweisen; und wenn ich mich in philosophischer Sprache ausdrücken wollte, würde ich sagen, daß niemand wie er die Kunst verstanden hat, sich des Konkreten zu bedienen, um das Abstrakte zu erreichen, und das Abstrakte der Kontrolle des Konkreten zu unterwerfen.“



Entstehung der elektromagnetischen Wellen (vereinfachte Darstellung)

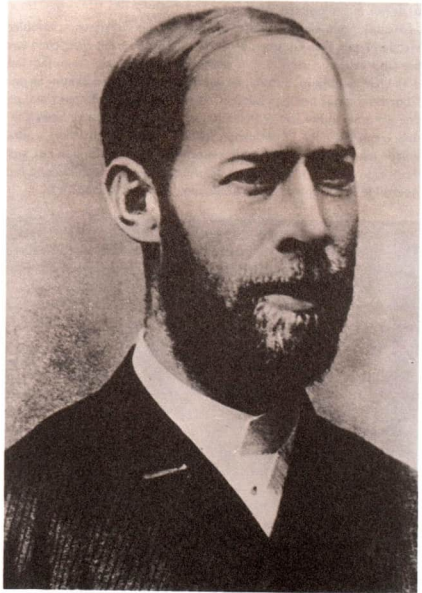
James Clerk Maxwell

Der Physiker JAMES CLERK MAXWELL (1831–1879) brachte Faradays Gedanken über die Natur und die Gesetze des elektromagnetischen Feldes in eine mathematische Form. Die Maxwell'schen Feldgleichungen sind berühmt geworden; sie geben den Zusammenhang an zwischen den Ladungen und Strömen und den von ihnen erzeugten Feldern. Die Gleichungen sind allgemein gültig; aus ihnen lassen sich alle Gesetze des Magnetismus, der Elektrizität und der Optik ableiten.

Aus ihnen ergab sich auch – zuerst nur theoretisch –, daß es elektromagnetische Wellen (Schwingungen) geben müsse. Der Physiker



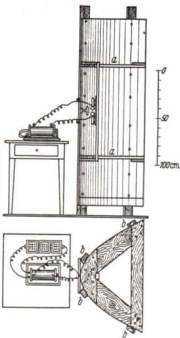
Der Oszillator von Hertz  
erzeugt elektromagnetische Wellen



HEINRICH HERTZ (1857–1894) hat sie 1887 im Experiment nachgewiesen; in seiner Schrift „Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft“ schilderte er diesen Erkenntnisweg sehr anschaulich. Er war dazu durch ein Thema angeregt worden, das Helmholtz der Berliner Akademie als Preisaufgabe vorgeschlagen hatte. Hertz hat die Aufgabe glänzend gelöst.

Sein Schwingungserzeuger (Oszillator) war ein Funkeninduktor mit Funkenstrecke. Hertz wies die Schwingungen durch kleine Funken am Resonator nach, einem Drahttring mit einer kleinen Öffnung für den Funken. Mit Funkenstrecke und Parabolspiegel bestimmte er die Wellenlänge und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen; die Geschwindigkeit entsprach der des Lichtes, wie Maxwell vorausgesehen hatte. Auch die gradlinige Ausbreitung, die Reflexion, die Brechung und die Polarisation seiner „Hertzschen Wellen“ konnte er nachweisen.

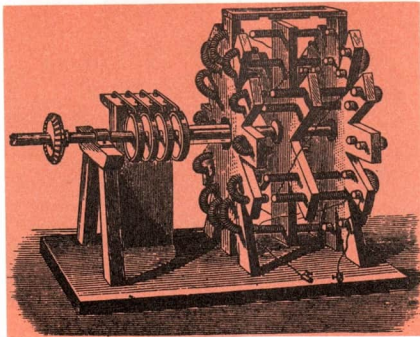
Als man erkannt hatte, daß das Licht ein Sonderfall, ein begrenzter Bereich der elektromagnetischen Wellen ist, wurde die Optik zu einem Teil der Elektrizitätslehre, und die Physik gliederte sich jetzt nur noch in zwei große Gebiete: erstens in die Mechanik mit der Akustik und der Wärmelehre und zweitens in die Elektrizität mit dem Magnetismus und der Optik.



Wellenexperiment mit Parabolspiegeln

## Die ersten elektromagnetischen Maschinen

Die ersten Formen der elektrischen Maschinen stammen aus dem physikalischen Laboratorium. Sie erscheinen uns heute als sehr merkwürdig. Der erste wirkliche Elektromotor wurde 1834 von dem Physiker MORITZ HERMANN VON JACOBI (1801–1875) in Petersburg, dem heutigen Leningrad, gebaut und zum Antrieb eines Bootes benutzt. Dieser Motor enthielt zweimal zwölf hufeisenförmige Elektromagnete im Ständer und acht stabförmige im Läufer und wurde batteriegepeist. Bei dem Spannungserzeuger der Brüder Pixii (1832) drehten sich die Pole eines starken, aus mehreren flachen Magneten zusammengesetzten Hufeisenmagneten vor der Ständerspule. Die erzeugte Wechselspannung wurde in einem ziemlich



Elektromotor von Jacobi

aufwendigen Stromwender mit zwei Hebeln gleichgerichtet. Man wußte damals nur mit Gleichstrom etwas anzufangen; dessen Gesetze waren bekannt. 1843 baute Stöhrer seine „magnetoelektrische Maschine“ mit sechs umlaufenden Spulen vor drei festen hufeisenförmigen Dauermagneten; Nollet ordnete zahlreiche Hufeisenmagnete sternförmig um den waagerechten Läufer an. Es gab noch zahlreiche weitere Bauarten, bis Stöhrer einen Stromerzeuger baute, bei dem der stabförmige Läufer sich in einem flachen, waagrecht liegenden Elektromagneten drehte.

Den entscheidenden Fortschritt brachte WERNER SIEMENS (1816 bis 1892), der 1866 das dynamoelektrische Prinzip fand: Seine „dynamoelektrische Maschine“ erzeugte den Strom für den Ständer-Elektromagneten selbst.

Siemens hatte Ständer und Läufer in Reihe geschaltet und den Weich-eisenkern des Ständers einmal mit einer Batterie magnetisiert. Der remanente (zurückbleibende) geringe Magnetismus genügte, um den ersten, noch schwachen Induktionsstrom im Läufer zu erzeugen. Dieser Läuferstrom verstärkte seinerseits das Ständerfeld, und so „schaukelten“ beide, Ständerfeld und Läuferstrom, einander empor, bis der induzierte Läuferstrom gerade so groß wurde, daß er das vorhandene Feld aufrechterhielt.



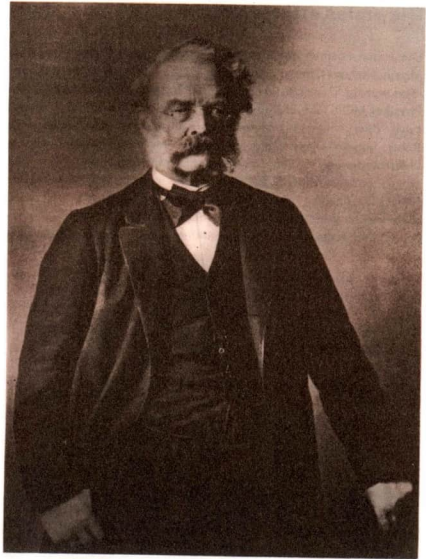
Spannungserzeuger von Pixii (1832)



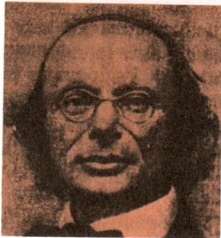


Dynamoelektrische Maschine  
von Siemens (1866)

Werner Siemens



Siemens war Physiker und Techniker zugleich. Er machte sich um die Entwicklung der Elektrotechnik durch zahlreiche bahnbrechende Entdeckungen und Erfindungen in hohem Maße verdient. Sein „Dynamo“ (wie die von ihm abgelehnte, schlechte Abkürzung heißt) setzte sich schnell durch und wurde auch von anderen – mit konstruktiven Änderungen – gebaut. Die große Energiequelle für alle Zwecke und Bereiche war gefunden; auf diese Weise ließ sich elektrische Energie leicht erzeugen, leicht überallhin leiten und leicht aufteilen.



Wilhelm Weber

## Telegraf und Fernsprecher verbinden Menschen und Erdteile

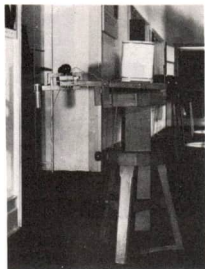
Die optischen und elektrochemischen Telegrafen genügten den Anforderungen nicht. Die entscheidende Wende brachten 1833 die beiden Wissenschaftler CARL FRIEDRICH GAUSS (1777–1855) und WILHELM WEBER (1804–1870) mit ihrer Erfindung des elektromagnetischen Telegrafen; CARL AUGUST VON STEINHEIL (1801 bis 1870) baute 1838 den ersten schreibenden Telegrafen; nun bekam der Begriff der Telegrafie erst seinen richtigen Sinn (griechisch *téle* = fern, *gráphein* = schreiben).



CHARLES WHEATSTONE (1802–1875), ein englischer Physiker und Elektrotechniker und bekannt als Erfinder der Meßbrücke für elektrische Widerstände, führte in England seinen nicht schreibenden, sondern nur anzeigenden „Nadel-Telegraphen“ ein, zunächst mit einer Nadel, dann mit zwei und schließlich mit fünf Nadeln (1837). 1838 entwickelte er zusammen mit Edward Davy den Zeigertelegraphen. Davy hatte den Gedanken der stufenweise fortschreitenden Bewegung durch Stromimpulse in Elektromagneten; dieser Grundgedanke wird noch heute in den Drehwählern der selbsttätigen Fernsprechanlagen benutzt.

In Amerika zeigte 1836 SAMUEL MORSE (1791–1872) das erste Modell seines Schreibtelegraphen, das er – als Kunstmaler – in eine Staffelei eingebaut hatte; 1838 meldete er seinen Telegraphen in Washington zum Patent an. Werner Siemens verbesserte den Morse-Telegraphen und brachte 1846 einen Zeigertelegraphen mit Selbstunterbrechung heraus. Bei dieser Entwicklung wird besonders deutlich, wie in mehreren Ländern und von verschiedenen Erfindern gleichzeitig gearbeitet wurde, weil ein allgemeiner Bedarf entstanden war. Die letzte Stufe der Entwicklung, die der Schnelldrucker, begann dann 1855 mit dem ersten brauchbaren Typendruck-Telegraphen (Druckschreiber) von DAVID EDWARD HUGHES (1831 bis 1900).

Die drahtlose Telegrafie entwickelte sich auf der Grundlage der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Heinrich Hertz. Der Franzose EDOUARD BRANLY (1846–1940) erfand 1890 ein Gerät zum Nachweis elektrischer Wellen, den „Fritter“ oder „Ko-



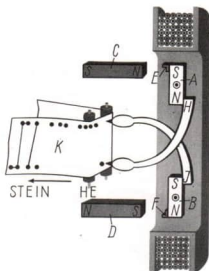
Der elektromagnetische Telegraf von Gauß und Weber



Der Kohärer (Fritter) von Branly

Karl-Friedrich Gauß





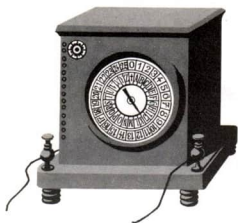
Der erste schreibende Telegraf  
von Steinheil



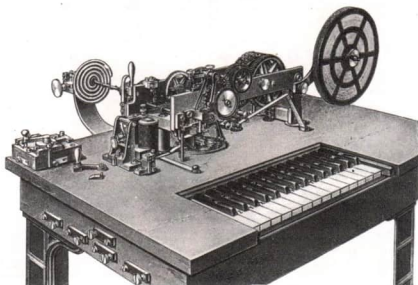
Samuel Morse

härer". Winzige Metallkörner in einer Glasröhre wurden in einen Stromkreis mit Batterie und Klingel gelegt und mit Antenne und Erde verbunden.

Der Berührungswiderstand der Körnchen war zunächst sehr groß, und die Klingel blieb stumm. Sobald aber elektrische Wellen eines



Zeigertelegraf von Breguet



Der Typendruck-Telegraf von Hughes

Funkensenders oder eines Blitzes die Antenne trafen, schweißten winzige Fünkchen die Körner zusammen, der Widerstand wurde viel kleiner, und die Klingel sprach an. Der Kohärer wirkte wie ein Relais. Noch empfindlicher wurde die Anlage, wenn man mit dem Kohärerstrom zunächst ein Relais betätigte, das dann einen Morse-schreiber und die Klingel einschaltete. Deren Klöppel schlug zugleich an den Kohärer, um die Körner wieder zu trennen und das Gerät erneut empfangsbereit zu machen. Das war umständlich, reichte aber eine Zeitlang bei langsamem Telegrafieren aus.

Der russische Wissenschaftler ALEXANDER STEPANOWITSCH POPOW (1859–1905) übernahm die Antenne, die er für Gewittermessungen gebaut hatte, zum Empfang elektrischer Wellen und erfand nach systematischen Experimenten die drahtlose Telegrafie. 1897 sandte er über eine Entfernung von 5 Kilometern das erste drahtlose Telegramm der Welt, die Worte „Heinrich Hertz“.



Erstes Modell des Morse-Telegraphen

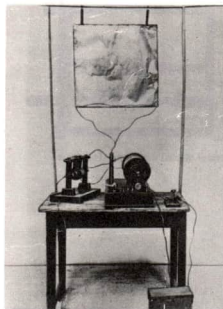


Zeigertelegraf von Siemens

Der italienische Erfinder GUGLIELMO MARCONI (1874–1937) kam unabhängig von Popow zu ähnlichen Ergebnissen und entwickelte die drahtlose Telegrafie zu internationaler Bedeutung. Er schickte 1902 das erste Telegramm über den Atlantischen Ozean.

NICOLO TESLA (1856–1943), ein jugoslawischer Physiker, erzeugte mit Hilfe seines Umspanners, des „Tesla-Transformators“, lange Wellen, mit denen er Glühlampen und Gasentladungsröhren in der

Alexander Stepanowitsch Popow



Marconis Funkentelegrafie-Sender

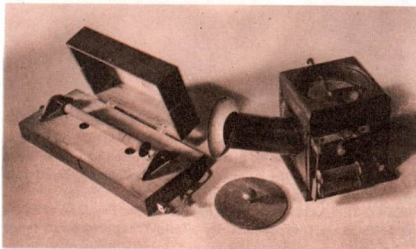


Guglielmo Marconi

Nähe – ohne Drahtverbindung – zum Leuchten brachte. Teslas Hoffnung, mit seinem Umspanner brauchbare Sender zu bauen, hat sich nicht erfüllt.

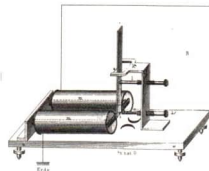
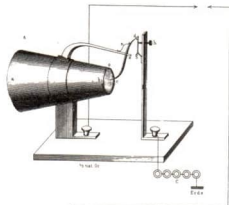
Der dänische Ingenieur WALDEMAR POULSEN (1869–1942) erzeugte als erster elektrische Wellen hoher Frequenz, und zwar mit Hilfe eines „tönenden Lichtbogens“ in Wasserstoff. Dieser Sender ist im ersten Weltkrieg benutzt worden.

Auf den Gedanken, den Elektromagnetismus zur Fernübertragung von Sprache und Musik zu nutzen, kam als erster der Lehrer PHILIPP REIS (1834–1874). Er sah den physikalisch richtigen Weg: Die Stromstärke im Stromkreis wird durch ein Aufnahmegerät (Mikrofon) genau den Sprachschwingungen entsprechend verändert; am anderen Ende des Stromkreises bringt man mit diesem „modulierten“



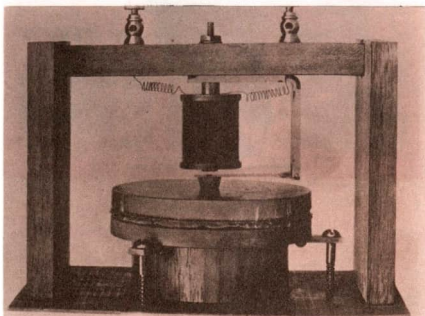
Der erste Fernsprecher von Philipp Reis

Strom elektromagnetisch etwas Metallisches zum Schwingen. Das Mikrofon von Reis hatte eine Membran, auf der ein Platinstückchen befestigt war; das Ende eines Platindrahtes lag lose darauf. Der Übergangswiderstand dieses Platinkontaktes änderte sich im Rhythmus



Mikrofon und Telefon von Reis

der Sprache. Die Stromstöße wurden zum Empfänger übertragen: einer Spule über einer Stricknadel, das Ganze auf einem Resonanzkasten befestigt.



Fernsprecher von Graham Bell



Der Amerikaner ALEXANDER GRAHAM BELL (1847–1922) verbesserte 1876 und 1877 den Fernsprecher durch Stabmagneten, Spule und Eisenmembran so weit, daß man den Hörer abwechselnd zum Sprechen und zum Hören benutzen konnte; der Fernsprecher war ein brauchbares technisches Gerät geworden.







# Das Zeitalter der neuzeitlichen Physik beginnt

Am Ende des 19. Jahrhunderts, als der Strom der Erkenntnisse schon riesengroß geworden war, gab es Physiker, die sagten: Jetzt haben wir alles erklärt, was es zu erklären gab; das Gebäude unserer Entdeckungen – mit der Krönung durch Newtons Mechanik und Maxwells Gleichungen – steht fest und schön da.

Andere Physiker jedoch waren überzeugt, daß der Mensch niemals alles erforschen könne, wohl aber immer mehr; sie glaubten nicht an einen Abschluß mit dem Ende des 19. Jahrhunderts, sondern forschten weiter, wo sie Widersprüche und offene Fragen wußten. Da die Techniker ihnen immer bessere, feinere und genauere Geräte zum Experimentieren bauten und die Mathematiker immer neue, großartige Gedanken und brauchbare geistige Hilfsmittel hervorbrachten, mit denen man das, was die Physiker beobachtet hatten, immer besser verstehen konnte, blieben die Erfolge nicht aus.

Dieses Zusammenwirken von Physik und Mathematik hatte schon im 19. Jh. seine reichen Früchte getragen und bleibende Theorien entstehen lassen – Forscher, die das verstanden, waren beispielsweise Carnot, Faraday, Newton, Clausius, Maxwell. Während sich jedoch das Wissen der Menschheit in der Zeit von 1850 bis 1950 verdoppelt hatte, also in 100 Jahren, geschah die nächste Verdopplung schon in 10 Jahren – von 1950 bis 1960. Seither wächst die Zahl der Erkenntnisse in atemberaubendem Tempo, und wir lesen fast täglich von neuen Forschungsergebnissen.

Die Naturwissenschaftler waren nicht mehr wie früher auf das angewiesen, was mehr oder weniger unmittelbar – mit den Sinnen oder verhältnismäßig einfachen Geräten – zu beobachten war, sondern sie drangen und dringen mit unendlich feinen bis riesengroßen Geräten und Maschinen in ganz neue, früher ungeahnte Gebiete ein.

Die Festkörperphysik untersucht den Aufbau und die Eigenschaften der festen Körper, aber sozusagen im Innersten: wie sich Atome und Moleküle zu Kristallen zusammensetzen, welche elektrischen

und chemischen Kräfte dabei wirken und was solche „Strukturen“ (Aufbauformen) für Eigenschaften und Wirkungen haben – beispielsweise bei elektrischen Leitern, Nichtleitern und Halbleitern; die Mikrophysik (griechisch mikrós = klein) durchforscht die Moleküle, Atome und die bisher bekannten aller kleinsten Dinge, die Elementarteilchen, die zur Quantenphysik mit unvorstellbar kleinen Mäßen führen.

Auch in den Bereich der Riesen Zahlen stießen die Physiker vor: in eine Welt mit der Lichtgeschwindigkeit von rund 300 000 km je Sekunde, die mit den Relativitätstheorien und der relativistischen Physik zu tun hat, und in den Weltraum – als Astrophysik.

Bald schon in unserem Jahrhundert wurde eines klar: Das meiste, was die Forscher des vorigen Jahrhunderts gefunden hatten, war durchaus richtig erklärt worden, und wir lernen es in der Schule auch noch so; aber – und das ist wichtig! – es gilt nur unter normalen irdischen Bedingungen. Das trifft zum Beispiel zu für Temperatur, Luftdruck, Geschwindigkeit, Kraft, Dichte und andere Eigenschaften der Körper. Die alte klassische Physik betrifft also nur einen Sonderfall: die irdischen Dinge und ihre Wirkungen. Sie hat einen gewaltigen Erkenntnisreichtum geschaffen; aber heute schauen die Physiker gleichsam in eine Unendlichkeit von Problemen und Aufgaben. Der einzelne ist längst nicht mehr in der Lage, alle Bereiche zu überschauen; jeder muß sich auf ein Teilgebiet beschränken, um dort Besonderes zu leisten. Da aber kein Teilgebiet der Physik für sich allein, ja nicht einmal die Physik als Ganzes ohne die anderen Wissenschaften bestehen kann, ergibt sich aus dieser Spezialisierung die Notwendigkeit, mit Wissenschaftlern zusammenzuarbeiten, die auf anderen Teilgebieten zu Hause sind. Die Zeit, in der ein Forscher seine Geräte selber bastelte oder (seit dem 16. Jh.) von einem tüchtigen Handwerker bauen ließ, um dann allein oder mit einigen Gehilfen zu experimentieren, ist längst für immer vorbei. Die hohen Kosten für moderne Laboratorien gar können heute nur noch vom Staat, von der Gesellschaft aufgebracht werden.

Bei besonders kostspieligen und wichtigen Untersuchungen, deren Ergebnisse allgemeine Bedeutung haben, arbeiten sogar jeweils mehrere Länder zusammen. Ein Beispiel sind die riesigen und immer noch wachsenden Anlagen der Kernphysik: die Bauten zum Beschleunigen von Elektronen und Protonen, in denen stets Forscher verschiedener Länder gemeinsam wirken. Sie sind in Gatschina, Dubna und Serpuchow (UdSSR), Genf (Schweiz) und in Berkeley und Brookhaven (USA) zu finden. Durch ein solches „Protonen-Karussell“ werden beispielsweise in Serpuchow die Protonen auf einer 1,2 km langen Kreisbahn durch 120 starke Magnete nahezu auf Lichtgeschwindigkeit gebracht; dann beobachtet man, wie sie sich verhalten.

Wir dürfen bei alledem aber nicht vergessen, daß die neuzeitliche Physik nicht schlagartig mit dem neuen Jahrhundert am 1. Januar 1801 begann, sondern daß viele neue Erkenntnisse in Arbeiten wurzeln, die schon Jahrzehnte zurückliegen.

Es gab aber auch Irrtümer, die später erkannt wurden und heute nur noch in Geschichtsbüchern aufgezeichnet sind. Dazu gehörte die Theorie des „Weltäthers“, mit der es sich so verhielt: Man kannte natürlich längst Schwingungen und Wellen und wußte, daß ein ins Wasser geworfener Stein Wasserwellen hervorruft oder der Schall

sich durch Luftwellen ausbreitet. Wie sollte man aber die Ausbreitung des unglaublich schnellen Lichtes erklären? Man dachte an Schwingungen, an Wellen; aber worin sollten die entstehen? Welcher Stoff sollte sie bilden? Huygens kam auf den Gedanken, der Weltraum, durch den ja das Licht der Sonne und der Sterne zur Erde kommt, sei nicht leer, sondern enthalte einen seltsamen Stoff als Träger der Lichtwellen: den „Lichtäther“. Noch 1907 schrieb der französische Physiker Poincaré in seinem Buch „Moderne Physik“:

„Dieser Lichtäther müßte natürlich, da er auch im sogenannten leeren Raum vorhanden ist, als unwägbare angesehen werden; man könnte ihn mit einer Flüssigkeit vergleichen, deren Masse vernachlässigt werden darf, weil sie der Bewegung der Gestirne keinen merkbaren Widerstand entgegensetzt, die aber außerordentlich elastisch ist, weil sich das Licht sehr schnell fortbewegt, die ferner alle durchsichtigen Körper durchdringen kann und dabei unverändert elastisch bleibt, sich aber zugleich verdichtet, weil ja die Lichtgeschwindigkeit in den Körpern geringer ist als im leeren Raum.“

Die Weltäthertheorie mit ihren Widersprüchen blieb umstritten, bis sie durch die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen 1889 durch Heinrich Hertz allmählich abgelöst wurde und „das Schmerzenskind der mechanischen Theorie“, wie Max Planck den Äther nannte, aus dem physikalischen Weltbild verschwand. Er wurde durch das elektromagnetische Feld mit seinen schon erwähnten Schwingungen abgelöst.

Das „Feld“ ist ein sehr wichtiger Begriff in der neuzeitlichen Physik geworden. Es bedeutet einen Raum, in dem jeder Punkt eine physikalische Größe hat; beispielsweise Temperatur in einem Temperaturfeld, elektrische Feldstärke in einem elektrischen Feld, magnetische Feldstärke in einem Magnetfeld. Wir kennen das Magnetfeld, den Bereich, in dem die Kraft eines Magneten wirkt. Wir leben im Schwerfeld der Erde, das heißt im Wirkungsfeld der Erdanziehung.

Das elektromagnetische Feld ist teils elektrisch, teils magnetisch; jede elektrische Veränderung erzeugt Magnetismus, dieser wieder Elektrizität und so fort – wie eine Kette mit zwei verschiedenen Arten von Ringen, die einander abwechseln. Um das zu erreichen, muß man Energie für das Feld erzeugen; das elektromagnetische Feld gibt diese Energie in Form von Wellen weiter, und zwar (immer schwächer werdend) nach allen Richtungen mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit von 300 000 km/Sekunde, im luftleeren Raum wie im luftgefüllten und durch alle elektrisch nichtleitenden Körper hindurch.

Das hatte der geniale Maxwell nur durch Nachdenken gefunden und in vier mathematischen Gleichungen niedergeschrieben!

Im Jahre 1864 sagte er: „Wenn sich ein elektromagnetisches Feld wie eine Lichtwelle ausbreitet, dann ist das Licht nichts anderes als eine elektromagnetische Welle, dann ist das Licht elektromagnetischer Natur und folgt elektromagnetischen Gesetzen.“ Die von ihm aufgestellten Gleichungen verbinden nicht nur die Elektrizität mit dem Magnetismus zum Elektromagnetismus, sondern diesen auch mit der Lehre vom Licht zu einem großen Ganzen; man spricht daher von Maxwells elektromagnetischer Lichttheorie.

Die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde wird in Hertz angegeben; 1 Hertz = 1 Schwingung/Sekunde. Je weniger Hertz, um so



Wellenlänge, Schwingungsweite und Frequenz bestimmen eine Welle

länger ist der Weg einer Schwingung, das heißt die Wellenlänge.

$$\text{Wellenlänge (in cm)} = \frac{3 \cdot 10^{10} \text{ cm/Sekunde}}{\text{Schwingungen/Sekunde}} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/}$$

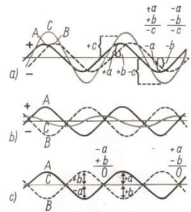
Schwingung.

Frequenz mal Wellenlänge muß immer 300 000 km ( $= 3 \cdot 10^{10}$  m) ergeben.

Überraschend weit ist der Bereich der Wellenlängen: von atomaren Größenordnungen ( $10^{-12}$  cm  $= 1/10^{12}$  cm) bis zu vielen Kilometern; entsprechend vielgestaltig sind die Erscheinungsformen in Natur und Technik.

## Um die Erklärung der Natur des Lichtes wurde heftig gestritten

Huygens war als einer der ersten für die Wellenform des Lichtes eingetreten; er gilt als Begründer der Wellenlehre des Lichts. Er und andere bewiesen deren Richtigkeit durch Experimente mit Überlagerung zweier Wellen (Interferenz), Brechung (Änderung der Richtung der Lichtstrahlen beim Übergang in einen dichteren oder weniger dichten Körper), Beugung, Schwingen der Lichtwellen in einer Ebene (Polarisation), Kristalloptik (Durchstrahlung von Kristallen). Erst gegen 1800 setzte sich die Wellenlehre durch; sie beherrschte das 19. Jh., und alles schien in schönster Ordnung zu sein. Und doch stimmte da etwas nicht! Kein Geringerer als Isaac Newton hatte Zweifel; er glaubte vielmehr daran, daß die Lichtstrahlen aus vielen, vielen kleinen Teilchen bestehen, die mit der bekannten hohen Geschwindigkeit von einem glühenden Körper (vor allem der Sonne) in alle Richtungen oder (etwa durch Spiegel oder Linsen gebündelt) in eine bestimmte Richtung fortgeschleudert werden. Auf weite Entfernungen verteilen sich dann die Teilchen bei gleichbleibender hoher Geschwindigkeit auf immer größere Räume oder Flächen; das erklärt die Abnahme der Lichtstärke. Die Energie des einzelnen Teilchens bleibt jedoch erhalten. Solche Teilchen werden heute Photonen (nach dem griechischen phos = Licht) und Strah-



Zwei Wellen A und B gleicher Wellenlänge überlagern einander und ergeben durch Addition und Subtraktion ihrer Höhen in jedem Punkt eine dritte Welle C, die sogenannte Interferenzwelle.

- a) Die Welle A wird durch die Welle B verstärkt zur Welle C
- b) Die Welle A wird durch die Welle B abgeschwächt zur Welle C
- c) Die Wellen A und B löschen sich gegenseitig aus

Eine Lichtwelle ändert ihre Richtung, wenn sie von einem Körper schräg in einen anderen mit anderer Dichte übergeht. Unter bestimmten Bedingungen wird sie zurückgeworfen (Totalreflexion)





Die Sprühdose schleudert kleine Masse-  
teilchen fort, die durch den Druck im  
Behälter mit Energie geladen sind

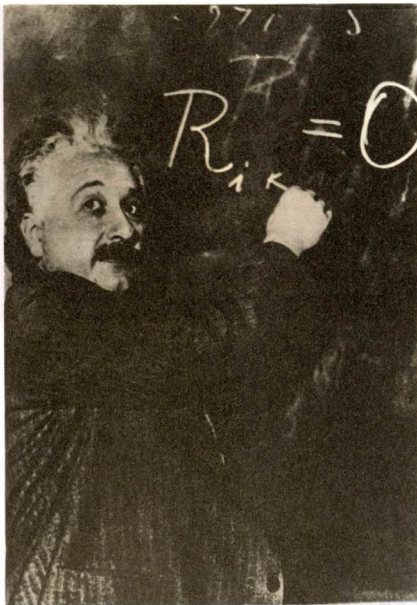
lungs- oder Lichtquanten genannt (nach dem lateinischen quantum = wieviel). Im Gegensatz zur Wellentheorie des Lichtes nannte Newton seine Auffassung Emissionstheorie (lateinisch emittire = aussenden). Die Vorstellung, die ihr zugrunde liegt, erinnert uns an die Wirkungsweise einer Sprühdose oder an einen feststehenden Gartensprenger in Tätigkeit; auch diese schleudern Teilchen weg. Die Emissionstheorie wurde ebenfalls durch Experimente bestätigt. 1888 beobachtete der Physiker WILHELM HALLWACHS (1859–1922), daß eine saubere Zinkplatte positiv elektrisch geladen wird, wenn sie von Licht bestrahlt wird. Außerdem stellte sich heraus, daß unter bestimmten Voraussetzungen bei Lichteinstrahlung ein fester Körper den elektrischen Strom besser leitet als im Dunkeln. Das war der Ausgangspunkt zu einer revolutionären Entwicklung in der modernen Physik, zur QUANTENTHEORIE von MAX PLANCK (1858–1947). Sie stellt, wie schon erwähnt, zusammen mit der Relativitätstheorie von ALBERT EINSTEIN (1879–1955) die größte Umwälzung dar, die es je in der Physik gegeben hat.

Der lichtelektrische Effekt wird dadurch hervorgerufen, daß das Licht aus Atomen des Metalls einige Elektronen herausschlägt. Ein Atom besteht ja aus einem positiv geladenen Kern und einer ebenso stark, aber negativ geladenen Anzahl von Elektronen, die den Kern umkreisen (alles so winzig, daß man es nicht einmal im Mikroskop sehen kann). Verschwinden Elektronen, so fehlt ihre negative Ladung, und die positive Ladung des Kerns überwiegt. Deshalb war die Zinkplatte positiv elektrisch geladen (siehe auch Seite 179).



Max Planck





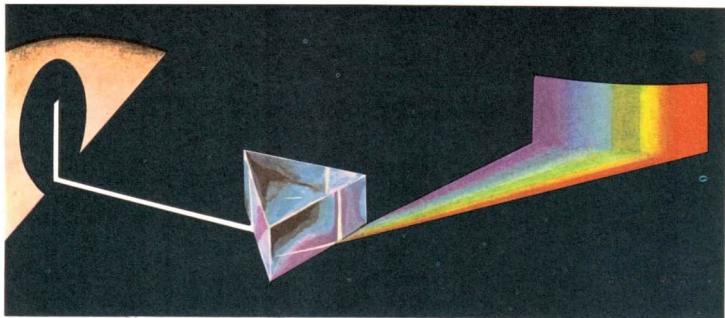
Albert Einstein

Auf solche Weise Teile eines Atoms herausschlagen kann keine elektromagnetische Welle mit ihren Feldern, sondern nur eine Strahlung von schnellen, energiegeladenen Quanten, ein „Energiepaket“. Max Planck stellte um die letzte Jahrhundertwende fest, daß die Energie eines Quants, dieses Teilchens, das von einem glühenden Körper ausgesandt wurde, um so größer ist, je größer die Frequenz der Strahlung ist. Planck fand unter anderem auch eine Größe, die er  $h$  nannte; mit ihr muß man die Frequenz ( $n$  genannt) multiplizieren, um den wirklichen Wert der Energie ( $E$  genannt) zu erhalten, mit dem man beim Experimentieren rechnen kann.

Wir können das eben Gesagte als Gleichung schreiben:

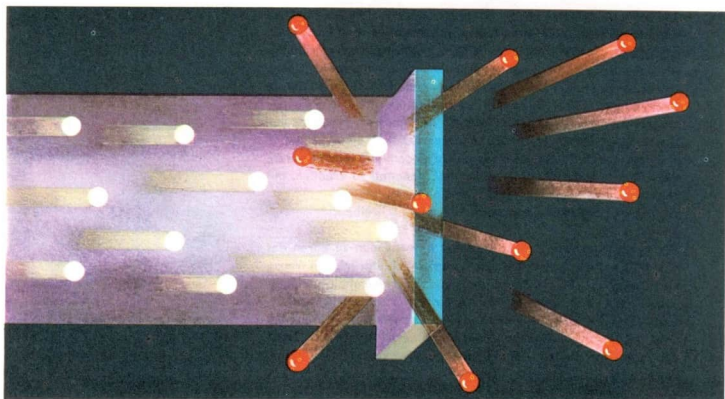
$$E = h \cdot n$$

Die unveränderliche Zahl (Konstante)  $h$  nennt man zu Ehren des Entdeckers „Plancksches Wirkungsquantum“. Natürlich ist  $h$  winzig klein, nämlich  $6,62 \cdot 10^{-27}$  erg · Sekunde (Energieeinheit mal Zeiteinheit). Mit Hilfe dieser Größe hat Einstein 1905 den lichtelektrischen Effekt erklärt, der heute in vielen Geräten und Anlagen benutzt wird: vom elektrischen Belichtungsmesser bis zu den großflächigen „Solarzellen“ (Sonnenbatterien) an den Weltraumflugkörpern.



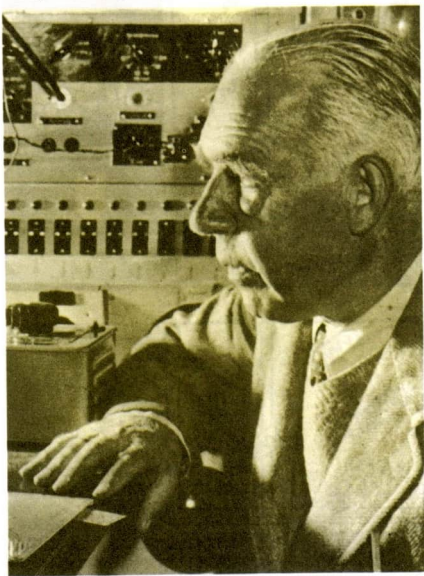
Jede Farbe hat ihre besondere Lichtwellenlänge und wird stärker oder schwächer als die anderen Farben gebrochen. Weißes Licht, das aus mehreren Farben besteht, wird daher im Prisma in diese einzelnen Farben, das Spektrum, zerlegt

Lichtelektrischer Effekt: Die Elektronen werden von den Lichtquanten aus Metall herausgeschlagen



Weitere wichtige Entdeckungen folgten. Der amerikanische Physiker ARTHUR HOLLY COMPTON (geboren 1882) bewies 1920, daß die Lichtquanten eine Masse haben, und bestätigte damit Einsteins Meinung, Licht übt tatsächlich einen Druck auf die Fläche aus, auf die es fällt, z. B. bei der Reflexion auf einen Spiegel. Dieser Druck ist bei weitem nicht stark genug, den Spiegel umzuwerfen, aber er stößt immerhin die Gasmoleküle eines Kometen, der sich der Sonne nähert, so stark ab, daß diese den leuchtenden Kometenschweif bilden.

Es wurden auch Röntgenstrahlen untersucht; dabei zeigte sich, daß auch sie aus energiereichen Teilchen bestehen, denn sie könnten sonst nicht vielerlei Körper durchdringen. Der dänische Physiker NIELS BOHR (1885–1962), der den Aufbau der Atome genau studiert hatte, fand die Ursache, warum solche Teilchenstrahlen entstehen: Es sind Sprünge, mit denen die Elektronen im Atom ihre Lage zum Kern verändern, „Quantensprünge“, bei denen die Elektronen Lichtquanten-Energie abgeben.



Niels Bohr

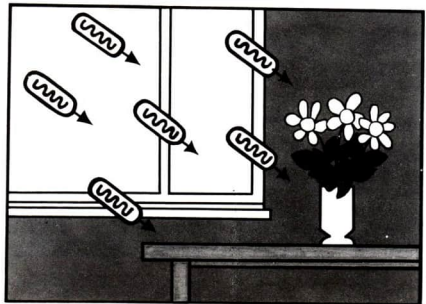
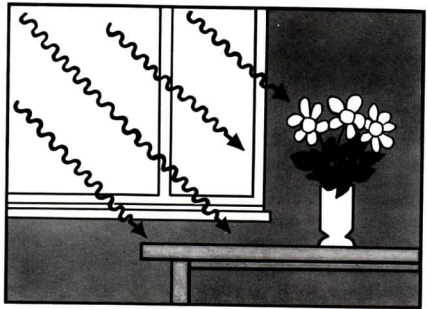
## Das Licht hat zwei Gesichter

Was ist nun bei all diesen Arbeiten herausgekommen? Besteht das Licht aus elektromagnetischen Wellen oder aus Teilchenstrahlungen? Die Antwort lautet:

Das Licht ist lediglich ein kleiner Teil einer großen Anzahl ähnlicher Erscheinungen, die nur andere Wellenlängen und Schwingungszahlen (Frequenzen) haben;

alle diese Erscheinungen, darunter auch das Licht, sind weder nur Wellen noch nur Teilchenstrahlungen, sondern beides gleichzeitig!

Das Licht hat also eine Doppelnatur, die freilich nur schwer vorstellbar ist: Teilchen mit Wellencharakter und Wellen mit Teilchencharakter. Die Physiker sind noch damit beschäftigt herauszufinden, unter welchen Voraussetzungen und in welcher Art diese Doppelnatur zustande kommt.



Die alte Vorstellung vom Sonnenlicht (a): ununterbrochene Wellenzüge, die Lichtstärke steigt mit der Schwingungsweite; die neue Vorstellung (b): einzeln schwingende Lichtquanten, mit ihrer Zahl steigt die Lichtstärke (nach Gamow)

# Relativitäts- und Quantenphysik

„Etwas ist relativ“ heißt, es steht nicht „absolut“ für sich allein sicher und endgültig da, immer gleichbleibend, wie man es auch betrachten mag – nein, es hängt vielmehr immer von etwas anderem ab. Hier bedeutet das: Es bezieht sich auf etwas anderes, es hängt mit ihm in irgendeinem mathematisch-physikalischen Verhältnis zusammen und kann oder muß sich entsprechend ändern, wenn sich das andere ändert.

Ein Elefant zum Beispiel ist relativ groß, wenn er vor uns steht, aber relativ klein, wenn wir ihn aus 100 m Entfernung sehen.

Ein „Genügend“ ist eine relativ erfreuliche Zensur für einen Schüler, der bisher nur „Ungenügend“ hatte, aber eine schlechte Note für einen guten Schüler. Das Urteil ist also bezogen auf die bisherigen Leistungen.

Eine Temperatur von 10°C draußen ist für uns im Winter hoch, im Sommer niedrig; das Urteil ist auf die Jahreszeit bezogen.

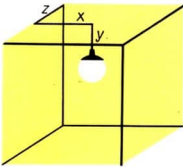
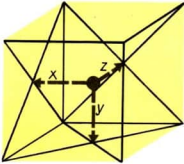
„Das Haus liegt auf der rechten Straßenseite“, sagt einer, der aus dem Wald in die Straße hineingeht. „Es liegt auf der linken Straßenseite“, behauptet ein anderer, der in entgegengesetzter Richtung zum Walde hin geht. Beide haben recht, bezogen auf ihre Bewegungsrichtung.

Bekannt ist auch, wie unsicher die Bezeichnungen „oben“ und „unten“ auf der Erde sind – ebenso „senkrecht“. Sie beziehen sich nur auf den einen Punkt, auf dem der betreffende Körper steht. Das hängt mit der Erdanziehung zusammen.

Der junge Albert Einstein untersuchte solche und weit schwierigere Fragen gründlich und legte 1905 – er war damals erst 25 Jahre alt! – seine Relativitätstheorie vor, die gemeinsam mit der fünf Jahre vorher veröffentlichten Quantentheorie von Max Planck einen ganz neuen Abschnitt einleitete: die relativistische Physik. Sie war ein geistiger Umbruch, eine ganz andere Art, die Natur zu betrachten.

Das schreckte viele Wissenschaftler aus ihrer beschaulichen Ruhe

der klassischen Physik auf, denn es ergab sich, daß Raum und Zeit und sogar die Masse eines Körpers keine festen, selbständigen Größen, sondern „relativ“ sind. Einstein, einer der bewundernswürdigsten Denker der Menschheit, kam zu Ergebnissen, die niemand bisher für möglich gehalten hatte – weil die Auswirkungen auf der Erde zu winzig sind, um sie zu beobachten. In diesem Sinne behalten die alten Naturgesetze nach wie vor ihre Gültigkeit; aber man kennt jetzt ihre Grenzen.



Die Lage eines Punktes oder Körpers im Raum wird festgelegt, indem man ihn auf ein (als fest gedachtes) System bezieht

## Der relative Raum

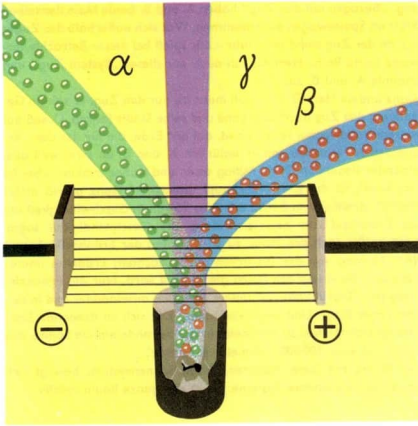
Alle Ortsangaben, feste Plätze, Wege, die ein bewegter (fallender, fahrender usw.) Körper nimmt – also auch Ortsveränderungen –, sind ungenau, wenn man nicht angibt, von wo aus der Beobachter das sieht. Es kommt immer auf den Standpunkt des Betrachters an und in welchem größeren Zusammenhang sich die Sache abspielt – man sagt, auf welches System sie sich bezieht. Zur Erläuterung einige Beispiele:

Der Mathematiker legt die Lage eines Punktes im Raum dadurch fest, daß er diesen Raum durch seine Grenzen (Wände) deutlich kennzeichnet, die Grenzen Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  und das Ganze ein Koordinatensystem nennt.

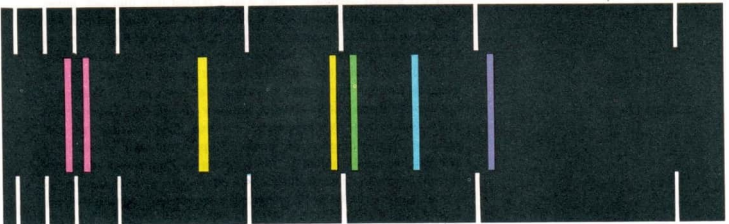
System bedeutet meist einen in sich geschlossenen Bereich mit bestimmten Zusammenhängen. Eine Modelleisenbahnanlage auf einem großen Tisch (mit Landschaft, Gleisen, Signalen, Zügen, Steuerpult, Bahnhöfen, Häusern usw.) ist ein Beispiel für ein geschlossenes System. Sie ist durch den Tisch deutlich begrenzt, und alles, was sich in der Anlage abspielt, bleibt in diesen Grenzen und hat keine Beziehung zu den Dingen außerhalb der Anlage auf dem Tisch. Nur die elektrische Verbindungsleitung zum Umspanner verbindet die Anlage mit dem nächsten System: dem Zimmer und dem Wohnhaus. Das Wort Koordinate kommt vom lateinischen *coordinare* = zuordnen, beordnen. Um einen Punkt auf einer Ebene festzulegen, braucht man zwei Koordinaten, im Raum dagegen drei. Mit den Abständen  $x$ ,  $y$  und  $z$  von den drei Raumkoordinaten Breite, Höhe und Tiefe ist also die Lage eines Punktes in einem Raumsystem bestimmt. Ein anderes Beispiel: Herr A. erzählt von seiner Fahrt von Berlin nach Dresden: „Gegen Mittag bin ich abgefahren, habe gleich Mittag gegessen und dabei im Speisewagen Herrn B. getroffen. Wir aßen gemeinsam an einem Tisch. Reichlich eine Stunde später trafen wir uns an derselben Stelle und tranken gemeinsam Kaffee.“ Können die beiden sich überhaupt an derselben Stelle getroffen haben? Herr C., der denselben Zug zur selben Zeit benutzte und die Herren A. und B. beobachtete, wird sagen: „Ja, beide haben sich an derselben Stelle wieder getroffen und nicht etwa in einem Abteil.“ Herr D. jedoch, dem das in Dresden berichtet wird, sagt lachend: „Das ist doch Unsinn: Mittag gegessen haben A. und B., während sie durch Zossen und Wünsdorf fuhren; als sie Kaffee tranken, fuhr ihr Zug durch Elsterwerda. Dazwischen liegen etwa 100 Kilometer!“ Wer hat recht?

Alle vier haben recht. A., B. und C. betrachten alles nur vom Zug aus. Der Zug war aber nur das System, auf das sich das Geschehen be-





Die drei Arten von Uranstrahlen werden  
im elektrischen Feld verschieden abgelenkt  
(zu Seite 169)



So sieht das Linienspektrum des Gases  
Helium aus  
(zu Seite 180)

zog. „Bezogen auf den Zug“, haben A. und B. beide Male denselben Platz im Speisewagen eingenommen. Was sich außerhalb des Zuges tat, ob der Zug stand oder fuhr – das spielt bei dieser Betrachtungsweise keine Rolle. Herr C. sah auch nur dieses „System Zug“ und stimmte A. und B. zu.

Ganz anders Herr D.: Der sah mehr als nur den Zug, er sah (in Gedanken) den Zug durch das Land und seine Städte fahren. D. saß auf diesem unbewegten festen Land, auf der Erde, die für ihn das „Bezugssystem“ war. Da sah er natürlich A. und B. an zwei weit auseinander liegenden Orten Mittag essen und Kaffee trinken. Aber ist das Land, ist die Erde überhaupt unbewegt? Ganz gewiß nicht! Herr D. dreht sich in Berlin mit etwa 950 km/h Geschwindigkeit um die Erdachse! Am Äquator beträgt die Geschwindigkeit sogar 1666 km/h; nach den Polen zu wird sie auf der Erdoberfläche mit dem Abstand von der (natürlich nur gedachten) Erdachse immer geringer, bis sie an den Polen gleich Null wird. Nur die Erdanziehung (die Gravitation) verhindert, daß alles auseinander und in den Weltraum fliegt. Und noch viel mehr: Die sich so drehende Erde bewegt sich mit fast 30 Kilometer in der Sekunde um die Sonne, das heißt, mit über 100 000 Kilometer je Stunde!

Die Sonne mit ihren Planeten, unser Sonnensystem, bewegt sich wiederum um andere Systeme. So ist der ganze Raum relativ.

## **Auch die Bewegung ist relativ**

Ein besonders einfaches und zugleich eindrucksvolles Beispiel von der Relativität der Bewegung hat fast jeder schon erlebt: Wir sitzen im Zug und warten ungeduldig, daß er endlich abfährt. Der Blick aus dem Fenster fällt nur auf einen direkt daneben haltenden Zug; es ist deutlich zu sehen, daß die Fahrgäste drüben ebenfalls auf die Abfahrt warten. Dann endlich ist es soweit. Hoherfreut sehen wir uns am anderen Zug vorbeigleiten – und urplötzlich ist der vorbei, und wir stellen überrascht und wenig erfreut fest, daß sich unser Zug überhaupt nicht von der Stelle gerührt hat, bezogen auf den Bahnsteig nämlich. Zu dem Gegenzug, der vor uns abfuhr, war eine relative Bewegung da; wir hatten sie nur „falsch herum“ empfunden. Es ist für physikalische Experimente ganz gleich, ob beide Züge zu gleicher Zeit in Fahrt gewesen waren oder – wie in dem Beispiel – nur einer; ebenso ist es einerlei, welcher von beiden Zügen stand und welcher fuhr. Wohlgemerkt: für den Physiker, der nur die relative Geschwindigkeit der beiden Züge zueinander wissen will; wir als Fahrgäste hätten ja lieber unseren Zug zuerst abfahren lassen! Solch ein Erlebnis ist natürlich nur möglich, wenn man lediglich einen Ausschnitt der Wagenwand des anderen Zuges und nichts vom Bahnhof sieht.

Auch die Bahnen, in denen sich Körper bewegen, sind verschieden, je nach dem System, auf das sie bezogen werden – das heißt, von wo aus man sie betrachtet. Eine Kugel fällt im Abteil eines gleichmäßig geradeaus fahrenden Zuges senkrecht herunter, genauso wie auf der „ruhenden“ Erde. Für jemanden, der draußen den Zug an sich vorbeifahren läßt und dabei durch die gläserne Zugwand den Fall beobachtet, beschreibt die Kugel eine gekrümmte Linie (eine Para-



Für den Fahrgast fällt die Kugel im Abteil des gleichmäßig geradeaus fahrenden Zuges senkrecht herunter (a); für den Außenstehenden beschreibt sie eine Parabel (b)

bel). Ein Flieger, der eine Kugel aus dem Flugzeug fallen läßt, sieht sie immer unterhalb der Stelle des Flugzeuges, an der sie herausfiel; für ihn fällt sie (immer kleiner werdend) scheinbar genau senkrecht hinab. Für einen Beobachter auf der Erde beschreibt die Kugel eine gekrümmte Linie (Parabel) und bleibt bis zum Aufschlag auf die Erde stets genau unterhalb des Flugzeuges. (Die Bremskraft der Reibung zwischen Luft und Kugel lassen wir hier außer acht.)

Daß man in einem geschlossenen Raum, der sich gleichmäßig geradeaus bewegt, nichts von dieser Bewegung merken kann, wußte schon Galileo Galilei. Er schrieb in seinem „Dialog“:

„Schließt Euch in Gesellschaft eines Freundes in einen möglichst großen Raum unter dem Deck eines großen Schiffes ein. Verschafft Euch dort Mücken, Schmetterlinge und ähnlich fliegendes Getier; sorgt auch für ein Gefäß mit Wasser und kleinen Fischen darin; hängt ferner oben einen kleinen Eimer auf, welcher tropfenweise Wasser in ein zweites, enghalsiges, darunter gestelltes Gefäß träufeln läßt. Beobachtet nun sorgfältig, solange das Schiff stille steht, wie die fliegenden Tierchen mit der nämlichen Geschwindigkeit nach allen Seiten des Zimmers fliegen. Man wird sehen, wie die Fische ohne irgendwelchen Unterschied nach allen Richtungen schwimmen; die fallenden Tropfen werden alle in das untergestellte Gefäß fließen. Wenn Ihr Eurem Gefährten einen Gegenstand zuwerft, so braucht Ihr nicht kräftiger nach der einen als nach der anderen Richtung zu werfen, vorausgesetzt, daß es sich um gleiche Entfernungen handelt. Wenn Ihr, wie man sagt, mit gleichen Füßen einen Sprung macht, werdet Ihr nach jeder Richtung hin gleich weit gelangen. Achtet darauf, Euch aller dieser Dinge sorgfältig zu vergewissern, wiewohl kein Zweifel obwaltet, daß bei ruhendem Schiffe sich alles so verhält. Nun laßt das Schiff mit jeder beliebigen Geschwindigkeit sich bewegen! Ihr werdet – wenn nur die Bewegung gleichförmig ist und nicht hier- und dorthin schwankend – bei allen genannten Erscheinungen nicht die geringste Änderung eintreten sehen. Aus keiner derselben werdet Ihr entnehmen können, ob das Schiff fährt oder stille steht.“

Das bisherige Ergebnis dieser Überlegungen zum Grundsatz der Relativität ist also:

*Die Lage im Raum ist immer relativ; es gibt keinen absoluten Raum.* Will man die Lage eines Gegenstandes im Raum angeben, so muß stets bekannt sein, auf welche anderen Dinge sich diese Lage bezieht. Ein Berg ist 1000 m hoch – über dem Meeresspiegel.

*Die Bewegung eines Körpers im Raum ist stets relativ; es gibt keine*



Eine Kugel fällt aus einem fliegenden Flugzeug

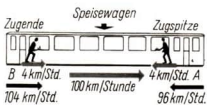
absolute Bewegung. Bei jeder Bewegung muß klar sein, auf welche ruhenden Flächen sich die Bahn bezieht, von wo aus sie also gemessen werden soll. Ergänzt sei hier, daß auch die Tageszeit auf der Erde relativ ist – bezogen auf den (1911 vereinbarten) „Nullmeridian“ von Greenwich (Großbritannien); er legt die „mitteleuropäische Zeit“ fest. Westlich davon muß die Uhr zurückgestellt werden; die „westeuropäische Zeit“ liegt beispielsweise um 1 Stunde zurück. Entsprechend werden die Uhren auf der Reise nach Osten vorgestellt: 1 Stunde für die „osteuropäische Zeit“, 2 Stunden für die „Moskauer Zeit“ und so weiter. Daß man dadurch bei einer Rundreise um die Erde in östlicher Richtung 24 Stunden „einspart“ und kalendermäßig um diese Zeit früher wieder heimkommt, ist der relativistische Grundgedanke der bekannten Reiseerzählung von Jules Verne: „Die Reise um die Erde in 80 Tagen“. Die Weltzeituhr auf dem Berliner Alexanderplatz zeigt uns die Relativität der Tageszeit für viele Orte der Erde.

## Die Geschwindigkeit ist ebenfalls relativ

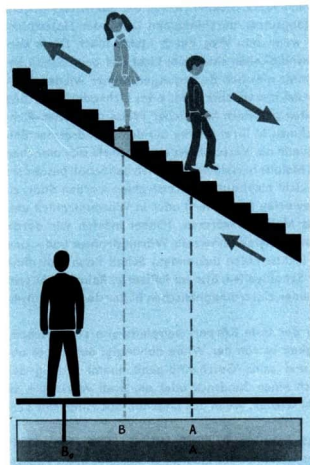
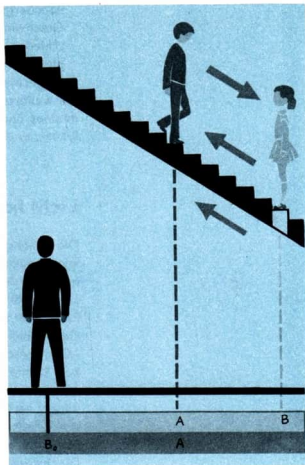
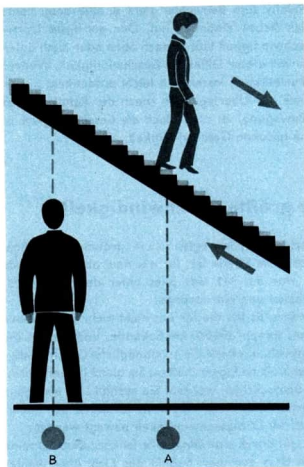
In einem D-Zug mit 100 km/h Geschwindigkeit sitzt Herr A. an der Zugspitze, Herr B. am Zugende. Genau in der Mitte des Zuges läuft der Speisewagen. A. und B. wollen einander dort treffen, um an derselben (und doch nicht derselben) Stelle Kaffee zu trinken. Jeder geht mit der Geschwindigkeit 4 km/h durch seine Zughälfte zum Speisewagen. Für jemanden, der im Zug mitfährt, haben A. und B. die gleiche Geschwindigkeit, nämlich 4 km/h. Ganz anders sieht es für jemanden aus, der den vorüberfahrenden Zug etwa von einem Bahnsteig aus betrachtet. An diesem Betrachter saust B. mit 104 km/h vorbei; denn seine Geschwindigkeit (4 km/h) und die des Zuges (100 km/h) haben sich addiert, weil sich beide in derselben Richtung bewegen. A. hingegen geht in entgegengesetzter Richtung, nämlich von der Zugspitze zur Zugmitte; seine Geschwindigkeit wird von der des Zuges abgezogen, und für den außenstehenden Beobachter bewegt er sich nur mit 96 km/h vorwärts.

Es ist einerlei, ob wir uns diesen Versuch auf einem Schiff oder Fahrzeug ausdenken, ob wir untersuchen, wie schnell ein Schiff beispielsweise mit der Flußströmung oder gegen diese fährt oder ein Schwimmer so schwimmt – immer kommt die Summe oder Differenz der Geschwindigkeit dabei heraus, wenn die Umgebung (Bahnsteig, Ufer) das Bezugssystem ist. Besonders gut und bequem können wir das bei einer Rolltreppe beobachten, wenn wir außerhalb der Treppe stehen;

1. A. steht, seine Kräfte schonend, auf einer Stufe und läßt sich hinauftragen. Seine Geschwindigkeit und die der Treppe sind gleich, relativ zum Betrachter; relativ zur Treppe ist seine Geschwindigkeit gleich Null.
2. A. hat es sehr eilig und steigt die fahrenden Stufen hinan; für den Betrachter addieren sich beide Geschwindigkeiten.
3. B. geht (wie es nicht sein soll) von oben die Stufen hinunter und bewegt sich dabei an einer Stelle mit der gleichen Geschwindigkeit abwärts wie die Treppe aufwärts. Seine Geschwindigkeit relativ zur Treppe ist gut zu sehen, wenn A. (nach Fall 1) an ihm



Relativität der Geschwindigkeit  
im fahrenden Zug



Drei Fälle relativer Bewegung an einer aufsteigenden Rolltreppe.

1. A geht mit der gleichen Geschwindigkeit hinab, mit der sich die Rolltreppe aufwärts bewegt.
2. Der Normalfall: B steht still und läßt sich hinauftragen.
3. B hat sich relativ zu A aufwärts bewegt

vorübergleitet. Relativ zum Betrachter steht B. still, denn beide Geschwindigkeiten heben einander auf. Der geringste Unterschied in der Geschwindigkeit läßt B. nach oben oder nach unten gleiten – aber nur mit dieser Differenz-Geschwindigkeit. Weitere Möglichkeiten (Variationen) lassen sich leicht ausdenken. Ein weiteres Ergebnis der Überlegungen (nach der Relativität des Raumes und der Bewegung) ist also: *Auch die Geschwindigkeit ist relativ; es gibt keine absolute Geschwindigkeit.*

## Licht hat die größte Geschwindigkeit

Die bisherigen Überlegungen bewegten sich in „irdischen“ Größen, wie es auch die klassische Physik tat; für uns neu, aber auch noch leicht verständlich war die Art, das alles unter der Überschrift „Relativität“ zu erfassen und einzuordnen.

Beim Licht ist es anders. Es hat die für uns nicht mehr vorstellbare Geschwindigkeit von knapp 300 000 km/Sekunde, und das ist die „Grenzgeschwindigkeit“, das heißt die größtmögliche Geschwindigkeit. Sie hat zwei erstaunliche Eigenschaften: Sie bleibt immer gleich, und sie kann nicht überschritten werden. Sie verhält sich also ganz anders als feste Körper, und diese wiederum verhalten sich höchst sonderbar, wenn sie mit Lichtgeschwindigkeit bewegt werden.

Man kann freilich Licht durch eine Glasplatte lenken; dann ist seine Geschwindigkeit im Glas geringer. Sobald das Licht aber wieder aus dem Glas austritt, bewegt es sich in der Höchstgeschwindigkeit weiter. Auch die Geschwindigkeit des Schalls ändert sich, wenn man ihn durch verschiedene Medien (Stoffe, die dazwischenliegen) leitet; nach einer langsamer durchlaufenen Luft- oder Holzschicht wird er schneller, wenn sein Weg durch Metall führt. Diese verschiedenen Geschwindigkeiten sind beim Licht und beim Schall bekannt; sie treten unter gleichen Bedingungen immer wieder auf – ohne Rücksicht darauf, aus welcher Quelle das Licht oder der Schall stammt. Beide breiten sich auch in gleicher Weise nach allen Richtungen aus und nehmen in ihrer Stärke mit dem Quadrat der Entfernung von der Quelle ab. Verschieden verhalten sie sich manchen Stoffen gegenüber: Metalle beispielsweise leiten den Schall besonders gut, lassen jedoch Licht nicht durch; Lichtstrahlen werden dadurch entweder zurückgeworfen (reflektiert) oder in Wärmestrahlen umgewandelt, die das Metall erwärmen. (Dabei müssen wir daran denken, daß glühendes Metall seinerseits Wärmestrahlen und – zum geringeren Teil – Lichtstrahlen aussendet.) Schall kann sich ohne Luft als Träger der Schallwellen, also im luftleeren Raum, nicht ausbreiten; Licht mit seiner elektromagnetischen Natur dagegen durchdringt jedes Vakuum.

Im Vergleich dazu der feste Körper, beispielsweise ein Geschöß: Seine Geschwindigkeit ist von der Waffe abhängig, aus der es abgeschossen wird, und seine Geschwindigkeit nimmt ständig ab; wird sie etwa durch einen Sandsack oder ein Brett verringert, so erhöht sie sich nicht wieder, wenn das Geschöß das Hindernis verlassen hat.

Der amerikanische Physiker ALBERT MICHELSON (1852–1931) untersuchte die Eigenschaften des Lichtes; er stellte u. a. im Experi-



ment die Lichtgeschwindigkeit fest. Er wußte, daß sich die Geschwindigkeiten addieren, wenn jemand im fahrenden Zug in Fahrtrichtung läuft, und daß die Differenz herauskommt, wenn der Betreffende sich zum Ende des Zuges bewegt. Michelson wollte wissen, ob sich das bei der Lichtgeschwindigkeit auch so verhält. Bei seinem berühmt gewordenen Versuch nahm er als zweite Geschwindigkeit (zum Addieren und Subtrahieren) einfach die Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne. Er schickte Lichtstrahlen in verschiedene Himmelsrichtungen und suchte mit einer klug ersonnenen Anordnung nach einem Zusammenhang zwischen Lichtgeschwindigkeit und Erdbewegung. Sie war nicht vorhanden. Damit bewies Michelson, daß die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Erdbewegung ist, daß es keinen „Weltäther“ und keinen absoluten Raum gibt.

Dieser Versuch wurde zum Ausgangspunkt der Relativitätstheorie; er ist inzwischen auch unter anderen Bedingungen mehrmals als richtig bestätigt worden.

Das ist das bedeutsame vierte Ergebnis: *Die Lichtgeschwindigkeit ist im leeren Raum (Vakuum) immer und überall gleich, sie ist die größte Geschwindigkeit überhaupt, also eine „Grenzgeschwindigkeit“, und sie ist nicht relativ, sondern absolut.*

Im Zusammenhang mit der Lichtgeschwindigkeit ist es schwer, wenn nicht gar unmöglich, sich die Vorgänge noch bildlich vorzustellen; die Maßstäbe sind gar zu groß geworden. Zum Verständnis der neuen Dimensionen sei noch ein Beispiel angeführt, das die sowjetischen Physiker Lew Landau (1908–1968) und Reimer in ihrem Buch „Was ist Relativität?“ gegeben haben:

Wir stellen uns einen Zug vor, der 5400000 km lang ist und auf einer geraden Strecke mit der gleichförmigen Geschwindigkeit von 240000 km/Sekunde vorwärts rast. (Zum Vergleich: Eine Weltraumrakete fliegt mit etwa 12 km/Sekunde ab.) Der erste und der letzte Wagen haben je eine Tür; die öffnet sich automatisch, sobald Licht darauf fällt. Noch ist alles dunkel; da blitzt plötzlich genau in der Mitte des Zuges ein Licht auf und breitet sich im Zug aus. Was geschieht? Das ist nach dem Versuch von Michelson nicht schwer zu beantworten: Das Licht breitet sich nach allen Seiten gleichmäßig mit 300000 km/Sekunde aus, ohne Rücksicht auf das System des rasenden Zuges; die Lichtgeschwindigkeit ist ja absolut und nicht relativ. Also werden zur selben Zeit, und zwar in 9 Sekunden ( $2700000 \text{ km} : 300000 \text{ km/Sekunde}$ ), der erste und der letzte Wagen beleuchtet, und die beiden Türen öffnen sich gleichzeitig. So sehen es die Leute im Zuge.

Relativ wird die Sache wieder, wenn wir fragen: Wie sehen die Leute auf dem Bahnsteig diesen Vorgang? Relativ zum Bahnhof bewegt sich das Licht ebenfalls mit 300000 km/Sekunde. Aber der letzte Wagen fährt dem Licht, das ja aus der Zugmitte kommt, entgegen, und er trifft schon nach 5 Sekunden mit dem Licht zusammen; die beiden Geschwindigkeiten addieren sich scheinbar (in Wirklichkeit ist das unmöglich, weil Licht die Grenzgeschwindigkeit hat). Immerhin sieht das mathematisch so aus:  $2700000 : (300000 + 240000) = 5$ . Hinter dem ersten Wagen muß das Licht sozusagen herlaufen; es holt ihn erst nach  $2700000 : (300000 - 240000) = 45$  Sekunden ein. Für die Leute auf dem Bahnhof öffnet sich daher die vordere Tür erst 40 Sekunden ( $45 - 5$ ) nach der hinteren Tür.

Mit Vorgängen irdischer Größenordnungen dürfen wir das allerdings nicht vergleichen. Man erfaßt die Welt der Lichtgeschwindigkeiten durch einfaches Vergrößern irdischer Maße ebensowenig wie die Welt der atomaren Winzigkeiten durch einfaches Verkleinern. Die klassischen Naturgesetze, auf der Erde nach wie vor gültig, gelten vielfach nur innerhalb bestimmter Bereiche (Grenzen); in den neuen Bereichen treten ganz andere, zum Teil völlig neue Erscheinungen, Kräfte und Wirkungen auf. Erwähnt sei hier die (vergleichsweise leicht verständliche und herstellbare) elektrische Supraleitung; in der Nähe des absoluten Temperatur-Nullpunktes ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) verschwindet plötzlich der elektrische Widerstand von Metallen. Unser rasender Zug wird beispielsweise durch seine hohe Geschwindigkeit für die Leute auf dem Bahnsteig verkürzt, und der Zeitunterschied zwischen dem Öffnen der Türen beträgt da nur 24 Sekunden. Auch die Zeit ist relativ, genau wie der Raum! Wenn in dem fahrenden Geisterzug beispielsweise 6 Sekunden verstrichen sind, zeigt die Bahnhofsuhr 10 Sekunden an. In utopischen Geschichten wird diese Zeitverlängerung bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit gern in Weltraumschiffen geschildert; wenn die Weltraumreisenden nach ihrer Zeit 10 Jahre unterwegs waren, sind auf der Erde schon Generationen von Menschen gestorben. Mit der Relativitätstheorie stimmt das überein; zu verwirklichen ist es freilich nicht. Man hat jedoch Versuche mit Überschallflugzeugen und „Atomuhren“ äußerster Ganggenauigkeit durchgeführt. So klein die Zeitunterschiede auch waren – sie haben die Richtigkeit der Theorie bestätigt.

## Ist die Masse eines Körpers unabhängig von der Geschwindigkeit?

Die Masse, gemessen in g, kg usw., ist eine Eigenschaft der Körper; bei gleichem Volumen hat der eine Körper mehr Masse, der andere weniger. Der Körper mit mehr Masse je Volumeneinheit ist „dichter“ als der mit weniger Masse. Man nennt daher die Beziehung Masse (in kg oder g) je  $\text{dm}^3$  (Liter bzw.  $\text{cm}^3$ ) die Dichte des Körpers. Das alles ist klassische Physik, leicht zu verstehen und bekannt.

Eine relativistische Fragestellung ist es, wenn man eine Masse in Bewegung setzt und fragt: Ändert sich die Masse relativ zur Beschleunigung? Ja, sie ändert sich; im Bereich unseres täglichen Lebens mit seinen (im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit) winzigen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen freilich so wenig, daß die Änderung nicht meßbar ist und von uns nicht wahrgenommen werden kann. Das ist gut so, denn sonst bekäme ja beispielsweise ein Schnellzug immer mehr Masse (und würde zugleich immer schwerer), je schneller er fährt! Die klassische Physik stellte diese Frage gar nicht; nicht etwa, weil die neuerkannten Gesetze von der Relativität in irdischen Verhältnissen nicht gelten würden – sie gelten auch da! Aber sie wirken sich hier so wenig aus, daß es nicht zu bemerken ist. Auch heute kann man selbst mit den empfindlichsten Meßgeräten die Vergrößerung der Masse beispielsweise eines fliegenden Überschallflugzeuges nicht messen. Sie läßt sich auf Grund unserer heutigen Kenntnisse jedoch ausrechnen, und die Ergebnisse zeigen entsprechend kleine Zahlen.

Wir überlegen nun folgendermaßen: Ein Körper kann nach dem Gesetz der Trägheit und durch eine Kraft in Bewegung gesetzt werden. Angenommen, die Kraft wirkt gleichmäßig in derselben Richtung immer weiter: dann bewegt sich der Körper von Sekunde zu Sekunde, von Stunde zu Stunde immer schneller; er wird „gleichmäßig beschleunigt“. Das gilt für den irdischen Bereich. Was aber, wenn sich die Bewegung des Körpers der Lichtgeschwindigkeit nähert? Dann verhält es sich ähnlich wie bei einer Luftpumpe, deren Austrittsöffnung verschlossen ist: Zuerst läßt sich der Kolben leicht hineindrücken; dann wird es allmählich schwerer, und bald ist der „Grenzwert“ erreicht. Theoretisch geht es immer noch ein ganz klein wenig weiter, aber immer weniger; und dafür wird der Druck auf die Luft sehr groß und immer noch ein wenig größer. Die Bewegung des Kolbens wird entsprechend kleiner.

Die Geschwindigkeit des fliegenden Körpers mit der Dauerantriebskraft wächst immer langsamer, je mehr sie sich 300 000 km/Sekunde nähert. Die Kraft wirkt jedoch weiter, und die Zeit ihres Wirkens ist nicht begrenzt. Irgendwo muß ein Ausgleich sein, gewissermaßen ein Ersatz für die immer kleiner werdende Steigerung der Geschwindigkeit. Es bleibt nur eine Lösung: Die Masse des Körpers muß sich ändern, muß immer größer werden – beim Erreichen der Lichtgeschwindigkeit unendlich groß. Wieder unvorstellbar; aber die Lichtgeschwindigkeit kann nun einmal nicht überschritten werden.

Man hat berechnet, daß die Masse des als Beispiel gewählten Geisterzuges bei 240 000 km/Sekunde 1,6mal so groß ist wie die des stehenden

Zuges; dafür ist der fahrende Zug nur  $0,6$ mal, also  $\frac{6}{10}$  so lang wie der stehende. Und im fahrenden Zug waren erst 6 Sekunden vergangen, während es auf dem Bahnsteig, also auch im stehenden Zug 10 Sekunden waren.

Wem die Sache mit der wachsenden Masse gar zu theoretisch erscheint, der irrt sich: In letzter Zeit haben es die Physiker fertiggebracht, in mächtigen Beschleunigern von kilometerweiter Ausdehnung Elektronen auf 270 000 km/Sekunde und mehr zu beschleunigen und die Masse dieser rasenden Elektronen mit der eines ruhenden Elektrons zu vergleichen. Dabei wurde experimentell bewiesen, daß die Theorie von der wachsenden Masse stimmt!

So erhalten wir schließlich als fünftes Ergebnis des Relativitäts-Prinzips den Satz: *Die Masse eines Körpers ist abhängig von seiner Geschwindigkeit.*

Es ist, das sei wiederholt, nicht so, daß diese Grundsätze erst von einer ganz bestimmten Geschwindigkeit an gelten und da plötzlich zu wirken beginnen. Nein, sie gelten auch in unserem irdischen Bereich, in den irdischen Größenordnungen der Geschwindigkeit. Aber ihre Auswirkungen sind so winzig, daß wir sie auch mit den besten Meßgeräten nicht feststellen können.

Das gilt auch für die bekannteste Entdeckung von Einstein: Masse und Energie sind gleichwertig und einander zugeordnet, und nach dem „Gesetz der Zuordnung“ ist eine Änderung der Masse stets mit einer Änderung der Energie verbunden und umgekehrt.

Holen wir auch hier etwas weiter aus: Arbeit ist das Produkt aus der Kraft, die an einem Körper angreift, und dem Weg, den der Körper durch das Angreifen dieser Kraft in Richtung des Weges zurücklegt. Setzen wir die Kraft  $F$  (vom englischen *force* = Kraft),

für den Weg  $s$  (vom lateinischen *spatium* = Entfernung, Zwischenraum) und für die Arbeit  $W$  (vom englischen *work* = Arbeit), so gilt die Gleichung  $W = F \cdot s$ .

Während der Bewegung speichert der Körper Energie in sich, mit der man vielerlei bewirken kann; der hochgezogene Fallklotz einer Ramme treibt, wenn er herunterfällt, mit der Energie seiner Fallbewegung einen Pfahl ins Erdreich; ein Hammer schlägt einen Nagel in die Wand; ein Auto, das gegen einen Baum fährt, wird beschädigt (verformt). Wir fahren auf der Achterbahn eines Jahrmärktes mit Hilfe einer Maschine (Elektromotor und Kette) auf den höchsten Punkt; von da an läßt uns die so in uns selbst aufgespeicherte Energie mit allerlei Überraschungen so lange von selber fahren, bis wir wieder unten sind und die Energie aufgebraucht ist.

Einstein nahm an, daß sich ein Körper selbst in Energie verwandeln kann, beispielsweise in die Energie einer elektromagnetischen Strahlung. Das elektromagnetische Feld muß dann ganz besonderer Art sein: Es muß (theoretisch) wägbar sein, also eine Art Masse oder Gewicht haben, jedoch ganz anders als der einst angenommene „Weltäther“ sein. Das neue Feld tritt nur dort auf, wo elektrische Ladungen oder magnetische Kräfte sind; in der Nähe ist es am stärksten, und mit wachsender Entfernung wird es zunehmend schwächer (weniger dicht). Die Lichtstrahlen sind dann schwingende Ströme dieses merkwürdigen Stoffes. Um das verständlich zu machen, kann man so sagen: Ein Körper strahlt einen Teil seiner Masse als Energie aus; was beim Körper noch greifbare und geschlossene Masse war, bildet nun in winzigen Teilchen in weiter räumlicher Ausdehnung das elektromagnetische Feld; eine „materialisierte Kraft“, wie der amerikanische Physiker George Gamow diesen seltsamen Zustand nannte.

Einstein faßte das Ergebnis in seiner berühmten „Energie-Masse-Gleichung“ zusammen:

$$E = m \cdot c^2$$

$E$  bedeutet die Energie,  $m$  die Masse und  $c$  (vom lateinischen *celeritas* = Geschwindigkeit) die Lichtgeschwindigkeit 300 000 km/Sekunde. Da  $c^2$  riesengroß ist, nämlich  $9 \cdot 10^{10}$  km/Sekunde, ist die Masse entsprechend sehr klein.

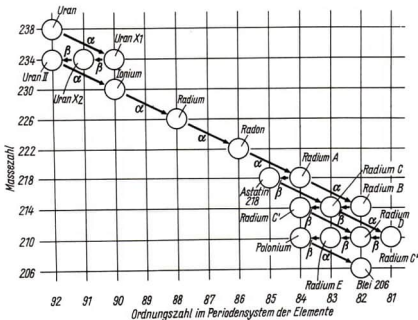
Die Energie, die bei der Explosion einer 20-Kilotonnen-Atombombe frei wird, entspricht einer Masse von ungefähr 1 g. Die Sonne freilich verliert täglich etwa  $4 \cdot 10^{11}$  Tonnen Masse (das sind etwa 4,4 Millionen Tonnen in jeder Sekunde), die sie als Strahlung verschiedener Art nach allen Seiten in den Weltraum schickt. Davon erhält die Erde nur den zweimilliardsten Teil; immerhin wird ihre Masse dadurch täglich um viele Tonnen größer. Das läßt uns ahnen, wie ungeheuer groß die Energie der Strahlung ist. Der Lichtdruck auf einen Spiegel und einen Kometen wurde bereits erwähnt; der russische Physiker PJOTR LEBEDEW (1866–1912) bewies ihn 1899 als erster im Laboratorium. Aus alledem geht hervor: Dieses neue Feld kann man nicht mehr wie irgendeine gewöhnliche Materie mit klassischen Mitteln auf klassische Eigenschaften, wie Festigkeit oder Plastizität, untersuchen; hier hilft nur die Mathematik (unter anderem in Gestalt der Maxwellschen Gleichungen) weiter.

# Das „Unteilbare“ (Atom) teilt sich immer mehr

Die Chemie benutzte den Begriff Atom als Baustein des Moleküls seit etwa 1800; die Physik folgte 50 Jahre später, als sie die kinetische Gastheorie aufstellte. Es tauchte die Frage auf: Woraus besteht ein Atom? Nach Franklin war Helmholtz 1881 bei Versuchen mit der Elektrolyse auf den Gedanken gekommen, die Elektrizität bestehe aus ganz kleinen Teilchen; Stoney nannte diese Elektronen. Über die Katodenstrahlen kam man auf den richtigen Weg; die letzte Gewißheit brachten 1897 die Arbeiten des holländischen Physikers PIETER ZEEMANN (1865–1943). 1911 wurde zum negativen Elektron das positive Proton entdeckt, und man dachte, damit die Bausteine des Atoms, die Elementarteilchen, alle zu kennen.

Einstein hatte 1905, wie schon berichtet, das Lichtquant (Photon) als weiteres Elementarteilchen angenommen. Gleichzeitig häuften sich die Entdeckungen zur Radioaktivität. HENRI ANTOINE BECQUEREL (1852–1909) entdeckte sie 1896 in Paris, als ein Stück Joachimstaler Pechblende eine lichtdicht umhüllte fotografische Platte schwärzte. MARIE CURIE (1867–1934) und ihr Mann PIERRE CURIE (1859–1906) konnten aus der uranhaltigen Pechblende mit unendlichen Mühen 1897 Spuren zweier Elemente nachweisen: Polonium (nach dem Heimatland Marie Curies, Polen, benannt) und Radium (von lateinisch radius = Strahl). 1900 gelang es ihnen, das radioaktive Element Uran zu isolieren; 1910 stellte Marie Curie das Radium rein dar.

Man entdeckte, daß radioaktive Elemente (z. B. Uran, Radium, Thorium) ständig selbsttätig Teile ihrer Masse in Form von Strahlungen aussenden (natürliche Radioaktivität); dabei strahlt 1 g Radium millionenmal stärker als 1 g Uran. Gleichzeitig nimmt die Masse ab (die Massezahl wird niedriger), das ursprüngliche Element verwandelt sich in ein anderes (der alte Traum der Alchimisten und Goldmacher!), wird immer leichter und erhält im Periodensystem der Elemente einen anderen Platz. Man spricht dann von einer Zerfallsreihe (Umwandlungsreihe). Die genannten drei Elemente werden zu



Radioaktive Zerfallsreihe



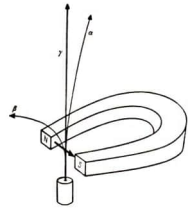
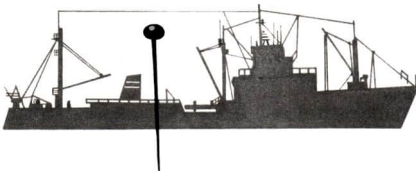


Blei. Hier wird also die Masse eines Körpers ohne Zutun des Menschen zu Strahlenenergie.

Besonders merkwürdig ist, daß Uran in seiner Umwandlungsreihe drei sehr verschiedene Arten von Teilchenstrahlen ausstrahlt, in die Alpha-Strahlen ( $\alpha$ -Strahlen), Beta-Strahlen ( $\beta$ -Strahlen) und Gamma-Strahlen ( $\gamma$ -Strahlen), so benannt nach den ersten drei Buchstaben des griechischen Alphabets. Die Gammastrahlen erwiesen sich als sehr „harte“ Röntgenstrahlen, tausendmal härter und durchdringender als die um die Jahrhundertwende bekannten. Sie haben keine elektrische Ladung und werden daher im elektrischen und Magnetfeld auch nicht abgelenkt. Die Betastrahlen bestehen aus Elektronen mit über 200 000 km/Sekunde Geschwindigkeit. Die Betastrahlen haben wie alle Elektronen eine negative elektrische Ladung; sie werden durch eine positive elektrische Ladung und durch einen magnetischen Nordpol stark abgelenkt. Die Teilchen der Alpha-Strahlen haben eine positive elektrische Ladung und sind viel schwerer als die Teilchen der Betastrahlen; sie bewegen sich nur ein Hundertstel so schnell wie diese und werden durch einen magnetischen Pol nur schwach abgelenkt.

Mit all diesen Entdeckungen wurde es immer nötiger, sich eine genauere Vorstellung, ein „Modell“ vom Aufbau des Atoms zu machen, um damit rechnen zu können. Der englische Physiker JOSEPH JOHN THOMSON (1856–1940) dachte an ein außen positiv geladenes Kügelchen („Tröpfchen“), in dessen Innerem negative Elektronen sitzen. Daß auch positive Ladungen in Atomen vorkommen, war damals schon bekannt. War ein Atom negativ, so hatten sich „überschüssige Elektronen eingenistet“, meinte Thomson Anfang dieses Jahrhunderts.

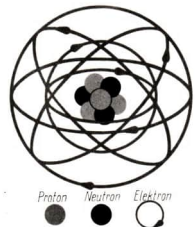
Der englische Physiker ERNEST RUTHERFORD (1871–1937), ein Schüler Thomsons, wies mit seinem Modell 1911 den Weg zur heutigen Auffassung: Das Atom besteht aus einem positiven Kern und einer Hülle aus negativen Elektronen. Diese Elektronen kreisen um den Kern, wie die Planeten um die Sonne; sie tun das mit sehr großer Geschwindigkeit, damit sie nicht durch die Anziehungskraft zwischen den entgegengesetzten Ladungen in den Kern stürzen. Die vom Kern weg wirkende Fliehkraft schützt sie davor. Beide Ladungen gleichen einander aus; das ganze Atom ist neutral. Rutherford berechnete die Größe des Atoms: Durchmesser des ganzen Atoms etwa  $1 \cdot 10^{-8}$  cm, des Atomkerns etwa  $1 \cdot 10^{-12}$  cm, also nur der zehntausendste Teil. Das Atom ist daher fast ganz „leer“, d. h., es besteht vor allem aus starken Feldern mit sehr geringer Masse.



Auch im magnetischen Feld werden die drei Arten der Uranstrahlen verschieden abgelenkt

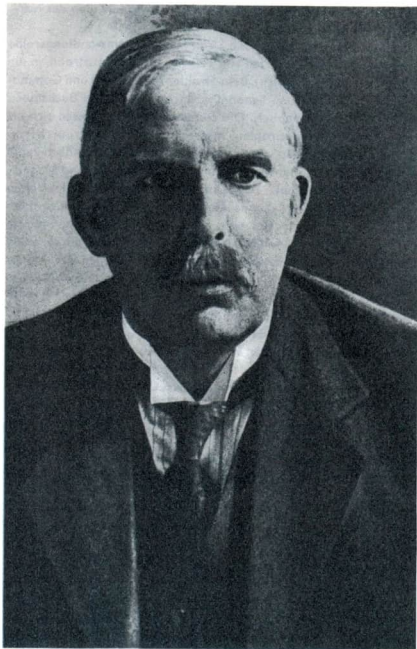


So dachte sich J. J. Thomson den Aufbau eines Atoms



Das Atommodell von Niels Bohr

Überseedampfer und Stecknadel



Ernest Rutherford

Nähme man (in millionenfacher Vergrößerung) den Atomkern so groß wie einen Kirschkern an, so wäre die Elektronenhülle ein Ballon von über 300 m Durchmesser! Auch in den festen Körpern ist die eigentliche Materie nur der aller kleinste Teil: daß sie „massiv“ zu sein scheinen, liegt an den erstaunlich starken atomaren Kräften. Die Kerne und Elektronen eines erwachsenen menschlichen Körpers ergäben als reine Masse nur eine mikroskopisch kleine Kugel von einigen tausendstel Millimetern; ein großes Überseeschiff von 20000 t brächte auf solche Weise erst eine Materie so groß wie ein Stecknadelkopf. Aber diese winzigen Körper würden soviel wiegen wie ein Mensch oder ein Schiff – durch eine unvorstellbar hohe Dichte!

NIELS BOHR (1885–1962) und der deutsche Physiker ARNOLD SOMMERFELD (1868–1951) verbesserten das Atommodell von Rutherford wesentlich, indem sie die Quantentheorie darauf anwandten und die Bahnen und Eigenschaften der Elektronen berechneten. Ihr Atommodell wird heute noch benutzt, obwohl 1926 der

österreichische Physiker ERWIN SCHRÖDINGER (1887–1961) und der deutsche Physiker WERNER HEISENBERG (geboren 1901) nachgewiesen haben, daß es keine wirklichen Elektronenbahnen gibt und diese Vorgänge weitaus komplizierter sind.

Die Folge dieser Erkenntnis war, daß sich die Atomphysik in mehrere Hauptrichtungen weiterentwickelte. Die eine behandelt den Atomkern und seinen Aufbau aus verschiedenen Teilen sowie seine Kräfte (die Kernenergie), die Radioaktivität und die Isotope (verschiedenartige Erscheinungsformen ein und desselben Elements, hervorgerufen durch unterschiedliche Zahl von Neutronen bei gleicher Protonenzahl). Griechisch bedeutet *isos* = gleich, *tópos* = Ort, Stelle. Andere Hauptrichtungen der Atomphysik befassen sich mit der Atomhülle, den Bewegungen (auch Sprüngen) und Eigenschaften der Elektronen sowie mit den Bildungskräften in Atomen und Molekülen fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe und des Plasmas (des sogenannten vierten Aggregatzustandes bei sehr hohen Temperaturen).

## Die Erforschung des Atomkerns

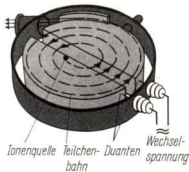
1911 wurde das Proton (griechisch = das erste) im Kern entdeckt. Es trägt zum Ausgleich der negativen Ladung des Elektrons eine gleich große positive Ladung. Seine Masse ist fast 2000mal so groß wie die des Elektrons.

1932 wurden die Elementarteilchen Positron und Neutron gefunden. Das Neutron hat die gleiche Masse wie das Proton, ist aber elektrisch neutral (daher sein Name). Das Positron hat die gleiche Masse wie das Elektron, ist aber positiv elektrisch.

In der Folgezeit entdeckte man die Mesonen (griechisch *mésos* = in der Mitte, zwischen); zunächst die leichten, dann die schweren (mit etwa der halben Masse eines Protons oder Neutrons) und schließlich 1951 die überschweren Mesonen, die schwerer als Protonen und Neutronen sind, also nicht mehr „in der Mitte“ zwischen diesen und den Elektronen liegen.

Die seltsamste Entdeckung sind die Antiteilchen (vom griechischen *ánti* = gegen): Antineutron, Antiproton usw.; das Anti-Elektron ist das Positron. Das Antiteilchen hat die gleichen Eigenschaften wie das jeweilige ursprüngliche Teilchen, aber eine entgegengesetzte elektrische Ladung oder einen entgegengesetzten Magnetismus oder eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung; ein Positron beispielsweise hat eine positive elektrische Ladung (der Name ist aus *positiv* und *Elektron* zusammengesetzt). Wenn ein Elementarteilchen mit seinem Antiteilchen zusammenkommt, müssen sich die entgegengesetzten Ladungen ausgleichen; dabei wird die Energie frei – die Teilchen zerstrahlen.

Einige Antiteilchen konnten erst in jüngerer Zeit in großen Anlagen nachgewiesen werden; sie sind nur für den winzigen Bruchteil einer Sekunde vorhanden. Ob es im Weltraum eventuell Sterne gibt, die ganz aus Antimaterie bestehen, wissen wir nicht. Ein Zusammenstoß zwischen einem solchen und einem Stern aus gewöhnlicher Materie würde zu einer Katastrophe führen; von beiden Sternen bliebe nur eine sehr große Strahlenenergie übrig.



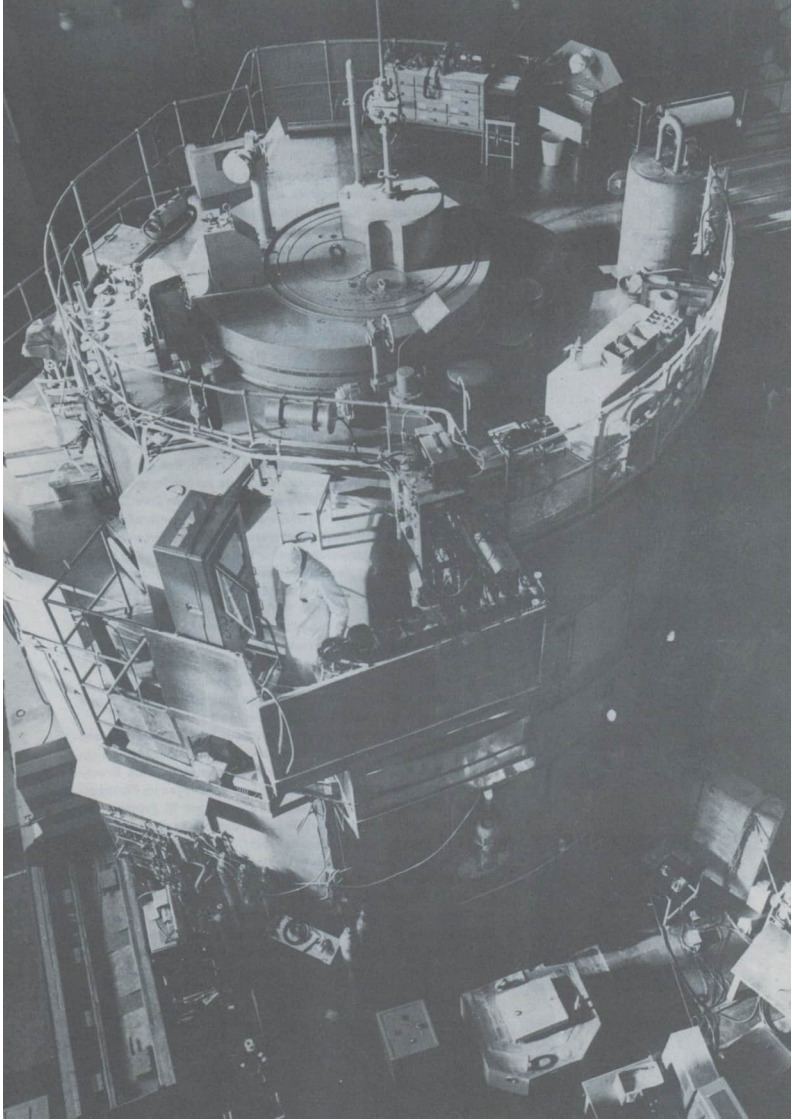
So arbeitet ein Zyklotron

Otto Hahn

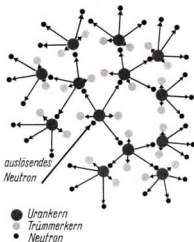


Im Verlaufe der Kernforschung stellte sich der Aufbau des Atomkerns als immer komplizierter heraus. Er ist in vielen Fällen nicht stabil (dauerhaft); hier zerfällt ein Proton in ein Neutron und ein Positron, dort werden Elektron und Positron zu einem Lichtquant (Photon). In riesigen Beschleunigungsanlagen (Zyklotronen, vom griechischen *kýklos* = Ring, Kreis) werden die Elementarteilchen oder Ionen (elektrisch geladene Atome) im starken Magnetfeld einer luftleeren Kammer auf einer spiralförmigen Bahn von der Mitte zum Rande hin immer schneller herumgejagt. Bewirkt wird die Beschleunigung durch ein schnell wechselndes (hochfrequentes) elektrisches Feld zwischen gegeneinander isolierten Elektroden, die wie ein D aussehen ( $D_1$  und  $D_2$ ). Ist die gewünschte hohe Geschwindigkeit und damit Energie der Teilchen erreicht, so werden sie mit Hilfe einer weiteren Elektrode nach außen auf die zu beschießenden Uranatome gelenkt.

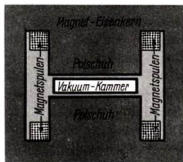
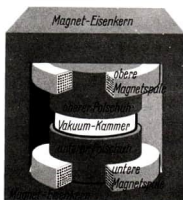
Nachdem die künstliche Radioaktivität, das Deuterium und die langsamen Neutronen entdeckt worden waren, gelang OTTO HAHN (1879–1968) gemeinsam mit Fritz Straßmann 1938 die Kernspaltung des Urans durch Bestrahlung mit langsamen Neutronen. Lise Meitner, die Mitarbeiterin Hahns, erhielt die Nachricht davon in Schweden und deutete das Ergebnis sofort richtig als Kernspaltung. Ein langsames Neutron zertrümmert dabei den Urankern; es entstehen







Eine Kettenreaktion



Vakuumkammer im Magnetfeld

zwei neue Urane (von zwei anderen Elementen) und etwa drei Neutronen. Diese treffen auf ebenso viele andere Urankerne und spalten sie. Sechs bis neun weitere Neutronen werden frei und zerbrechen neue Urankerne, und so setzt sich das mit riesiger Geschwindigkeit fort – allerdings wesentlich verwickelter, als hier dargestellt wird.

Wirksam war bei dieser Kettenreaktion (ebenso wie beim natürlichen Zerfall des Schwermetalls Uran) die Uransorte (das Isotop) Uran<sup>235</sup>. Nur dessen Kerne lassen sich in der geschilderten Weise zertrümmern. Im Verhältnis zum Isotop Uran<sup>238</sup> ist es jedoch nur in sehr geringer Menge in der Natur vorhanden (0,7 Prozent). Uran<sup>235</sup> muß daher erst auf langwierige und kostspielige Weise vom Uran<sup>238</sup> getrennt werden.

Im zweiten Weltkrieg wurde in den USA aus dem spaltbaren Material Uran<sup>235</sup> Kernsprengstoff hergestellt und zum Bau von Atombomben verwendet. Amerikanische Flugzeuge warfen 1945 zwei Atombomben über den japanischen Städten Hiroshima und Nagasaki ab; dabei wurden etwa 335 000 Menschen getötet und 400 000 verstümmelt.

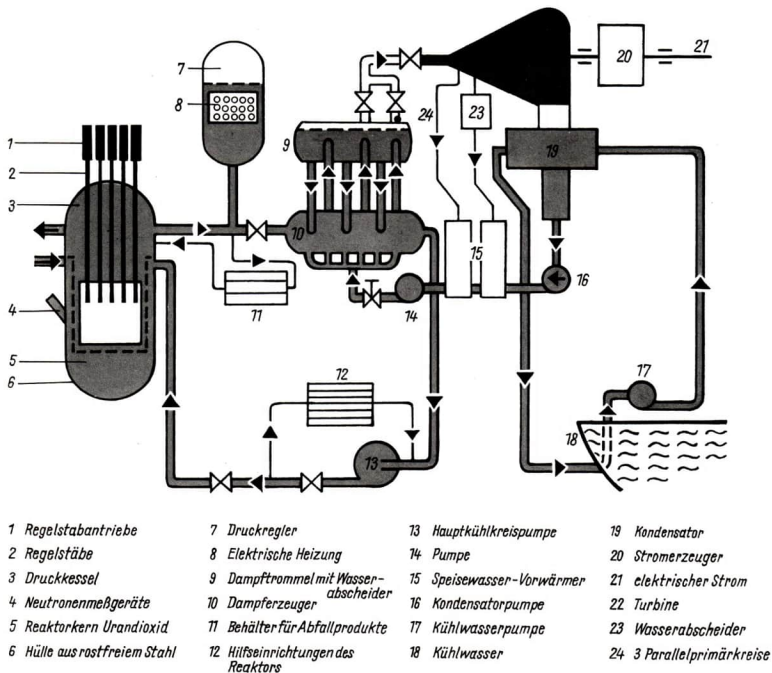
Diese verbrecherische Ausnutzung der Erkenntnisse kernphysikalischer Forschung durch die imperialistischen USA wurde von den Menschen in aller Welt verurteilt. Die Weltfriedensbewegung und an ihrer Spitze die sozialistischen Länder fordern, daß der Bau von Atomwaffen (Kernwaffen) eingestellt und die vorhandenen vernichtet werden. Die Atomkernenergie soll nur friedlichen Zwecken dienen. Ein Beispiel dafür sind die Kernenergiewerke (Atomkraftwerke), die mit der Zeit die bisherigen Dampfkraftwerke ersetzen werden.

Die ersten Kernenergiewerke arbeiten mit Kernreaktoren, in denen Uran oder Plutonium durch Neutronen gespalten werden. Dabei wird sorgfältig darauf geachtet, daß die Spaltung und damit die frei werdende Kernenergie nicht so groß wird, daß sie Schaden anrichten kann. Es ist noch nicht möglich, die Kernenergie unmittelbar in elektrische Energie zu verwandeln; zur Zeit wird noch Dampf damit erzeugt, der in der bekannten Weise Turbinen antreibt. Dadurch ist der Wirkungsgrad (das Verhältnis der benutzbaren Leistung zu der Leistung, die man erst in die Anlage hineinstecken muß, damit sie läuft) noch nicht sehr hoch, aber das wird sich ändern.

Die Forscher suchen und finden weitere neue Elementarteilchen und bauen in riesigen Anlagen neue Elemente auf, die in der Natur nicht vorkommen und meist nur eine geringe Lebensdauer von Bruchteilen einer Sekunde haben. Die neuen Elemente liegen im Periodensystem der Elemente jenseits vom Uran, das mit 92 Protonen im Kern die Ordnungszahl 92 hat; sie heißen deshalb Transurane (nach dem lateinischen trans = jenseits, über). Immer wird Uran – und bei höheren Ordnungszahlen auch ein Transuran – mit Neutronen oder schweren Geschossen, nämlich ganzen geladenen Atomen (Ionen) beschossen. Dabei kommt es darauf an, daß Neutronen in das Uranatom eindringen und sich dort in Protonen verwandeln.

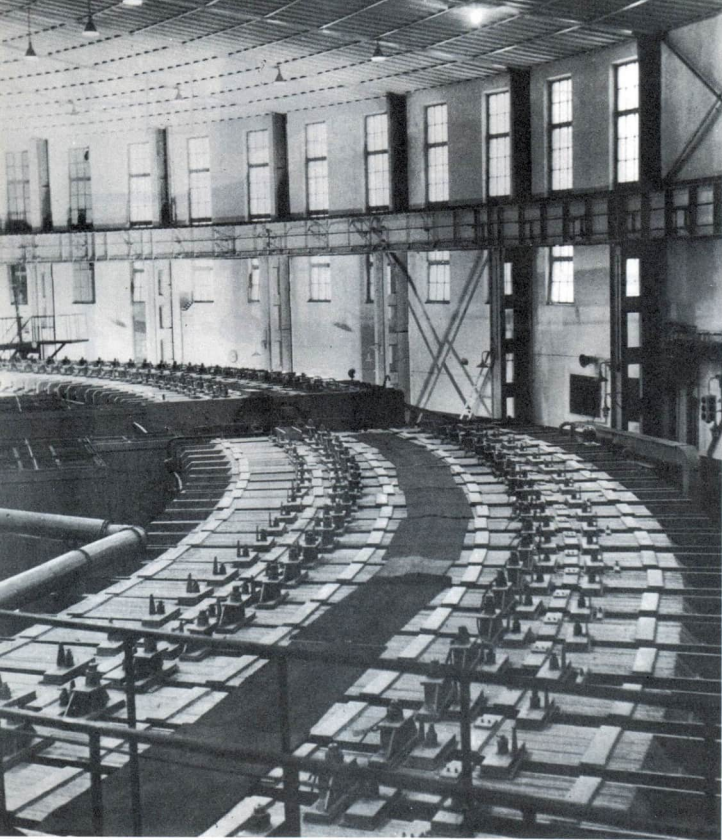
Seit 1789 hatte Uran den höchsten Platz im Periodensystem (92) eingenommen. 1940 stellten die Amerikaner McMillan und Philip Abelson in Berkeley – noch ziemlich zufällig – das Transuran 93 her und nannten es Neptunium. Das nächste ist das schon genannte und heute viel genutzte Plutonium mit der Ordnungszahl 94. Bis zum Transuran 100 (Fermium) entstanden unter anderem diese neuen





Elemente in Kernreaktoren durch Bestrahlung mit Neutronen. Vom Transuran 101 an wird mit schwereren Geschossen bombardiert, und immer größere Anlagen, die Beschleuniger, sind nötig; in ihnen erhalten die Geschosse die nötige Geschwindigkeit und damit Energie, um die abstoßende elektrische Kraft der Atomkerne der beschossenen Stoffe zu überwinden, in die Kerne einzudringen und sich mit ihnen zu neuen Atomkernen zu verbinden. 1955 wurde so das Mendelevium (Ordnungszahl 101) gefunden, später das Nobelium (102), das Lawrencium (103), 1964 von sowjetischen Physikern in Dubna das Kurtschatowium (104) und 1969 dort auch das Element 105. Die Physiker denken schon daran, Uran oder gar Transuran als Geschosse (mit elektrischer Ladung, also in Form von Ionen) zu verwenden, um extrem schwere Transurankerne mit Massezahlen 400 bis 500 zu erhalten. Dazu gehören freilich noch viel größere Anlagen zum Beschleunigen der Geschosse, als sie jetzt vorhanden sind.

Schema eines Kernenergie-Kraftwerkes



Teilchen-Beschleuniger in Dubna  
bei Moskau

## Die Erforschung der Atomhülle

Die Erforschung der Eigenschaften und Bewegungen der Elektronen hat ebenfalls viele neue und wertvolle Ergebnisse gebracht, und zwar nicht nur für die Physik, sondern auch für die Chemie und für die anwendende Industrie. Physik und Chemie gehen gerade auf dem Gebiet der Atomforschung so sehr ineinander über, daß keine scharfe Abgrenzung mehr festzustellen ist.

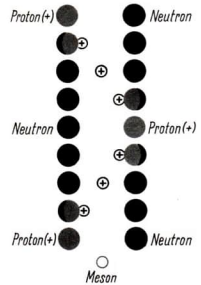
Es zeigte sich, daß die „Kernkräfte“, welche Protonen und Neutronen aneinanderbinden, nur bei allernächster Nachbarschaft der Kernteilchen (bis  $1 \cdot 10^{-13}$  cm) wirken. Sie können Kernteilchen, die etwa die zwanzigfache Entfernung voneinander haben, nicht mehr binden. Der holländische Physiker JOHANNES VAN DER WAALS (1837–1923) kam auf den Gedanken, daß dort statt der elektrischen Kräfte Austauschkräfte auf sehr merkwürdige Weise wirken: Sie lassen zwischen Proton und Neutron ein drittes Elementarteilchen hin und her sausen, und dieses dritte Teilchen hält so die beiden ersten zusammen.

Der japanische Physiker HIDEKI YUKAWA (geboren 1907) vermutete 1935, daß ein solches drittes Teilchen vorhanden sei, und nannte es Meson. Es wurde 1947 entdeckt.  $5 \cdot 10^{17}$  mal in der Sekunde bewegt sich das Elementarteilchen Meson zwischen Proton und Neutron hin und her. Es erhielt seinen Namen allerdings nicht, weil es sich zwischen den anderen Teilchen bewegt, sondern weil seine Masse zwischen der des Protons oder Neutrons und der des Elektrons liegt. Springt das Meson vom Proton fort, so nimmt es dessen positive Ladung mit und bringt sie dem (neutralen) Neutron; das Proton ist dadurch ein Neutron geworden und das Neutron ein Proton. Dann geht das in umgekehrter Richtung vor sich und so fort; die Ladungskraft wird ständig ausgetauscht.

Nach dem Atommodell von Bohr umfahren die Elektronen den Kern auf bestimmten Bahnen (Quantenbahnen); diese liegen in verschiedenen Entfernungen vom Kern. Man kann sich das (sehr vereinfacht) so vorstellen, daß der Kern von mehreren Schalen in verschiedenen Abständen umgeben ist und auf jeder Schale eine bestimmte Anzahl von Elektronen Platz findet. Es gibt eine K-Schale, das ist die innerste; dann folgen in Abständen die L-Schale, M-Schale, N-Schale, O-Schale, P-Schale und Q-Schale. Die Durchmesser der Schalen K, L, M usw. verhalten sich wie 1:4:9:16 usw. Manche Elemente haben weniger Schalen (Sauerstoff beispielsweise hat nur die K- und die L-Schale), andere haben mehr, Kupfer zum Beispiel vier (K bis N); Radium und Uran haben alle sieben Schalen.

Immer ist das Atom bestrebt, jede Schale mit Elektronen so weit aufzufüllen, wie es für das jeweilige Element erforderlich ist: die K-Schale bis 2 Elektronen, die L-Schale bis 8, die M-Schale bis 18, die N-Schale bis 32, die O-Schale bis 50 und die P-Schale bis 72 Elektronen. Auf der jeweils äußeren Schale sitzen die Elektronen, die für die chemischen Umsetzungen (Reaktionen) ausschlaggebend sind, beispielsweise für den Aufbau und Umbau von Molekülen aus einzelnen gleichen oder verschiedenen Atomen. Natürlich sind die Schalen keine wirklichen Gefäße etwa in Form einer halben Hohlkugel; die schnelle Bewegung der Elektronen läßt nur eine solche Scheinvorstellung (Modellvorstellung) entstehen.

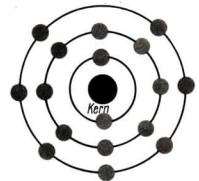
Aus der Erkenntnis der Bindungskräfte zwischen den Atomen entstand die Kristallphysik, die den Aufbau fester Körper in Form von Kristallen untersucht: in welcher Art sich das Kristallgitter eines festen Körpers aus Atomen oder Ionen oder Molekülen regelmäßig anordnet und aufbaut und welche Eigenschaften es durch die Bindekräfte und die Elektronen hat. Die besonderen Forschungen über die Frage, wie sich die Elektronen in solchen kristallinen, festen Stoffen bewegen, führten zur Halbleiterphysik und darüber hinaus zu den neuen großen Industriezweigen der Transistortechnik in der Nach-



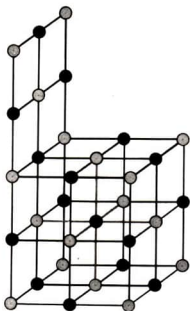
Das Pendel-Ladungsspiel des Mesons zwischen Proton und Neutron



Ein Millimeter in der Mikrowelt



Das Chlor-Atom hat einen Kern und insgesamt 17 Elektronen auf 3 Schalen



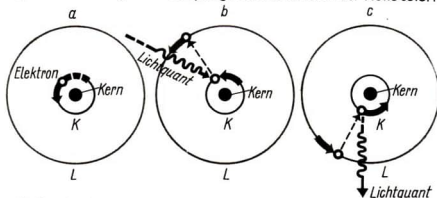
Das Kristall-Gitter von Kochsalz  
(Natriumchlorid)

richtentechnik, der Steuer- und Regeltechnik und Mikroelektronik; die Automatisierung der Industrie ist ohne Halbleiterbauelemente ebenso wenig denkbar wie der Bau von Computern und Weltraumraketen.

Die Atomhülle aus Elektronen gab noch weitere Geheimnisse preis: Die Erklärung für allerlei Lichterscheinungen. Die Elektronen können nämlich von einer Schale zur anderen „springen“. Nun haben die Elektronen auf jeder Schale eine andere Energie, und zwar um so mehr, je weiter sie vom Kern entfernt sind. Soll also ein Elektron von einer inneren Schale auf eine weiter außen liegende springen (etwa von M auf N), so muß es dazu erst Energie aufnehmen. Das ist beispielsweise dadurch möglich, daß es ein Lichtquant (Photon), das ihm durch Anstrahlen zugeführt wird, „verschluckt“. Geht dagegen ein Elektron auf eine näher zum Kern gelegene Schale über, so braucht es weniger Energie; es gibt dann ein „Energiepaket“ in Form eines abstrahlenden Lichtquants (Photons) ab. Es leuchtet also auf. Das Elektron muß daher, wenn es (unsichtbar oder sichtbar) leuchten soll, erst durch Zufuhr von Energie zu einem „Quantensprung“ auf eine Schale weiter außen angeregt werden. Dann ist das Elektron „angeregt“, das heißt mit größerer Energie geladen; es springt so bald wie möglich wieder auf seine Ausgangsstelle zurück und gibt dabei die zusätzliche Energie wieder ab. Dieser Vorgang kann auch allmählich, also nicht sprunghaft, ablaufen.

Verschiedene Stoffe können bei diesem Vorgang unsichtbare Strahlen in sichtbare umwandeln; das wird unter den Namen Lumineszenz (lateinisch *luminare* = leuchten) in den Bildschirmen der Fernsehgeräte und Röntgengeräte sowie in Elektronenmikroskopen ausgenutzt. Bei einigen Stoffen springen die Elektronen der Hülle sofort

Quantensprung eines Elektrons im Wasserstoff-Atom: a) energetischer „Grundzustand“; b) Energiezufuhr und Sprung zur nächstäußeren Schale, das Elektron ist „angeregt“; c) Sprung zurück in den Grundzustand, das zugeführte Energiepaket (Lichtquant, Photon) wird wieder abgestrahlt



(in Bruchteilen einer Sekunde) zurück, man nennt dieses Experiment Fluoreszenz; bei anderen Stoffen dauert es Stunden oder Tage, dann spricht man von Phosphoreszenz (Nachleuchten). Bei dem schon auf Seite 150 erwähnten lichtelektrischen Effekt fällt Licht auf eine Zinkplatte und löst je nach der Lichtmenge mehr oder weniger Elektronen aus den Metallatomen. Die so frei gewordenen Elektronen werden in elektrischen Belichtungsmessern als Ströme gemessen. Die Elektronen können auch von einer Schale zu einer weiter entfernten, etwa zur übernächsten oder einer noch entfernteren, springen. Dann hat das abgestrahlte Licht jedesmal eine andere Wellenlänge (und Farbe); ebenso wenn das Elektron zwischen verschiedenen benachbarten Bahnen (Schalen) springt – etwa von N nach M oder L nach K oder M nach L usw. Mit der Frequenz (Schwingungen je Sekunde) und dem verschiedenen Energiegehalt der Photonen lassen sich nun auch die Brechung des Lichtes und die Zerlegung von

Lichtquellen in die Farben des Spektrums erklären, desgleichen die Tatsache, daß jedes chemische Element, das in gasförmigem Zustand zum Leuchten gebracht wird, unter gleichen Bedingungen stets das gleiche, unveränderliche Spektrum aussendet (siehe auch Seite 157). Es besteht aus einzelnen senkrechten Linien und wird daher Linienspektrum genannt.

Diese Tatsache wird dazu benutzt, um Elemente an ihrem Spektrum zu erkennen – sogar bei den leuchtenden Sternen, über weite Entfernungen des Weltalls hinweg. Eine besondere Wissenschaft entstand daraus: die Spektroskopie (lateinisch spectrum = Erscheinung, Bild; griechisch skopéin = sehen).

Die Kenntnisse vom Feld und Elektron und ihren Eigenschaften werden ständig umfangreicher; viele bekannte Erscheinungen werden immer besser erklärt; der Einblick in die innersten Bereiche der Natur wird immer deutlicher. Immer deutlicher wird auch die Erkenntnis, daß wir nach wie vor in bestimmten Grenzen, in begrenzten Bereichen arbeiten, über die wir noch nicht hinausschauen können. Theorien, die für alle Felder, für alle Teilchen gelten, und solche, die gemeinsam für Felder und Teilchen gelten, sind noch nicht gefunden worden; aber das bisher Erforschte läßt viel Neues erwarten.

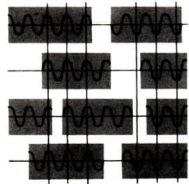
## Angewandte Atomhüllenphysik: der Laser

Als Beispiel, wie die neue Physik der Atomhüllen angewendet wird, soll hier die Lasertechnik stehen. Der Name ist eine Abkürzung des amerikanischen Begriffs Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation, auf deutsch: Lichtverstärker durch angeregte (erzwungene) Aussendung von Strahlen.

1960 begann die Entwicklung der Lasertechnik, schon 5 Jahre später hatte sie ihren Platz in der Forschung und Industrie erobert. Die sowjetischen Physiker ALEXANDER PROCHOROW und NIKOLAI BASSOW sowie der amerikanische Physiker CHARLES TOWNES haben für ihre grundlegenden Arbeiten auf diesem Gebiet 1964 den Nobelpreis für Physik bekommen.

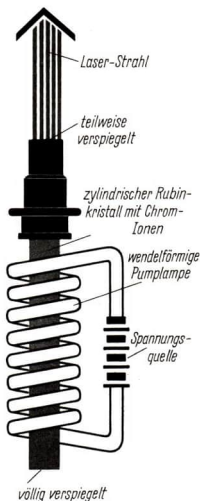
Licht breitet sich gleichmäßig nach allen Richtungen von der Lichtquelle aus; dabei wird seine Energie mit dem Quadrat der Entfernung von der Quelle schwächer, weil es sich auf eine mit dem Quadrat der Entfernung immer größere Fläche verteilt. Man sucht nun ein energiereiches Licht, das in weite Entfernungen strahlt und in der Nähe als Energiequelle brauchbar ist. Dazu ist folgendes nötig:

- Das Licht darf nur eine einzige Wellenlänge (und Frequenz) haben; es muß also einfarbig sein.
- Die Wellenlänge muß sehr klein sein; die kurzen Wellen haben mehr Energie als die langen. Geeignet sind Wellenlängen um  $10^{-3}$  cm; das sind sehr hohe Frequenzen von  $10^{13}$  bis  $10^{14}$  Hertz (Schwingungen je Sekunde).
- Die Laserstrahlung muß genau parallele und kohärente Wellenzüge haben. Kohärent heißt „zusammenhängend“ (vom lateinischen cohaerere = zusammenhängen, in sich zusammenhalten). Physikalisch bedeutet das, daß die Wellen oder Wellenpakete (Photonen, Lichtquanten) nicht nur genau in ihren Formen und

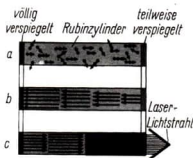


Kohärentes Licht aus Wellenpaketen, die mit gleicher Phase laufen





Aufbau eines Rubin-Lasers



Die Vorgänge im Rubin-Laser, vereinfacht dargestellt

Größen übereinstimmen, sondern daß sie ihre höchsten und tiefsten Punkte immer genau zur selben Zeit haben. Man sagt, sie laufen in gleicher Phase, sozusagen im gleichen Schritt und Tritt. Nur so stören und schwächen sich die Schwingungen nicht gegenseitig durch Überlagerung.

Der Weg zum Erfüllen dieser Forderungen wurde von den Forschern in der Eigenschaft der Elektronen der Atomhülle erkannt, Energie aufzunehmen und zu speichern (Sprung auf eine weiter außen liegende Schale, die mehr Energie verlangt) und sie danach wieder abzugeben (Sprung zurück auf die alte, innere Schale). Ein Laser arbeitet deshalb nach folgendem Grundsatz: In einem Stoff mit geeigneten Atomen werden Elektronen durch Einstrahlen sehr starken Lichtes mit Energie „vollgepumpt“, auf äußere Schalen, sozusagen die Energieleiter hinauf, „hochgejagt“; physikalisch ausgedrückt: angeregt. Bei der Rückkehr in den Normalzustand geben sie selbst Licht von einer einzigen Wellenlänge ab.

Als Stoff wird (außer Gas und Halbleitern) beispielsweise ein 5 bis 10 cm langer, bleistiftstarker, künstlicher Rubinkristall (Halbedelstein aus Aluminiumoxid) benutzt, der viele Chrom-Ionen in sich birgt. Diese Chrom-Ionen sind der aktive Teil; der Rubinkristall ist nur der Raum, in dem sie wirken. Die eine Endfläche des Rubins ist vollständig, die andere teilweise verspiegelt (mit einer spiegelnden Fläche aus Silber verschlossen, welche die Lichtstrahlen zurückwerfen kann). Ein Teil des Lichtes wird zwischen diesen Spiegelflächen hin und zurück geworfen; dabei regt es weitere Elektronen in den Chrom-Atomen an und verstärkt so das Licht. Schließlich bricht das sehr stark gewordene parallele Licht als gebündelter Laserstrahl aus der teilweise verspiegelten Seite heraus. „Energiepumpe“ ist eine Gasentladungslampe, die wendelförmig den Rubinstab umschließt.

Im einzelnen geschieht dabei folgendes:

- Durch die Strahlen der wendelförmigen Gasentladungslampe werden einige der Chrom-Ionen im Rubinzylinder angeregt, das heißt, sie nehmen Energie auf. Sie gehen aber sofort wieder in den alten Zustand zurück und geben dabei die eben aufgenommene Energie in Form von Photonenstrahlen (Lichtstrahlen) nach allen Richtungen wieder ab. Trifft ein Strahl dabei auf weitere Chrom-Ionen, so regt er diese an; dadurch wird er verstärkt. Strahlen, die nicht parallel zur Längsachse des Rubinzylinders laufen, verlassen den Rubin an den verschiedensten Stellen und gehen verloren. Achsenparallele Strahlen (in der Zeichnung waagerechte) treffen auf die Spiegel.
- Die achsenparallelen Strahlen (in der Zeichnung sind der Einfachheit halber nur die nach links laufenden als Beispiel angedeutet) werden zwischen den Spiegeln vielfach hin und her geworfen (reflektiert).
- Durch diese vielfältigen Reflexionen werden immer neue Chrom-Ionen zum Strahlen angeregt, und die Energie der gesamten Strahlung wächst lawinenartig außerordentlich stark an; wenn die größte Energie erreicht ist, schießt der Laserstrahl durch die teilweise versilberte, also auch teilweise durchlässige Begrenzung hinaus.

Die Energie eines Laserstrahles ist außerordentlich groß; dabei muß man bedenken, daß der Strahl sehr dünn ist. Es gibt bisher keine



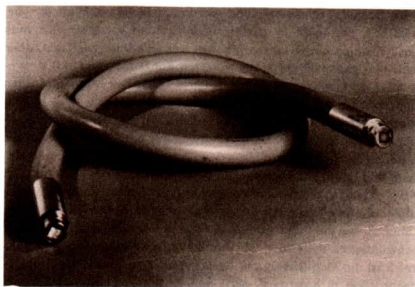
andere Möglichkeit, Energie derart zu konzentrieren. Ein Versuch hat das sehr deutlich gezeigt: Auf den etwa 400 000 km entfernten Mond wurde ein Laserstrahl gerichtet. Der Strahl lief mehrmals zwischen Erde und Mond hin und her; alle 2,6 Sekunden war er auf dem Bildschirm auf der Erde zu sehen, bis die Energie verbraucht war. Als der Laserstrahl zum ersten Mal den Mond traf, entstand dort ein so heller Lichteﬀekt, als hätte man ein Blitzlicht aus einigen Metern Entfernung abgebrannt.

Die Anwendung des Laserstrahles erfolgt in zwei Richtungen: Als Träger riesiger Energie wird er zur Erzeugung sehr hoher Temperaturen verwendet. Man kann damit beispielsweise schwer schmelzbare Metalle schmelzen und verdampfen (etwa Wolfram bei 3380°C), das heißt in gasförmigen Zustand versetzen. Da man Laserstrahlen durch Linsen (ähnlich wie gewöhnliches Licht, aber sehr viel genauer) auf einen winzigen Punkt (Brennpunkt) zusammenführen kann, lassen sich auch harte Werkstoffe damit schneiden und bohren; dabei sind so winzige Löcher möglich, wie sie kein mechanischer Bohrer herstellen kann. Bis 8000°C können im Brennpunkt entstehen! Mit entsprechend weniger Energie haben sich die Laser auch schon in der Medizin (zum Beispiel in der Strahlenbehandlung und in der Mikrochirurgie) bewährt.

Als Träger für die Übermittlung von Nachrichten (Signalen) wird die große Reichweite der Strahlen ausgenutzt. Lasergeräte werden (ähnlich wie die Radargeräte) verwendet, um Entfernung und Geschwindigkeit entfernter Objekte zu messen. Besonders aussichtsreich ist die Möglichkeit, mit Laserstrahlen Tausende von Telefongesprächen zu befördern, ohne daß diese sich gegenseitig stören. Der Laserstrahl ist dabei die Trägerwelle, die von den Schwingungen der Ferngespräche oder Bildsendungen überlagert (moduliert) werden. Es werden bereits Laser-Nachrichtenstrecken vorbereitet, die eine Million und mehr Ferngespräche gleichzeitig über einen einzigen Strahl übertragen können. Auch Laser-Nachrichtenverbindungen mit Raumschiffen und Raumstationen sind geplant. Vielleicht wird in absehbarer Zeit elektrische Energie in Laserstrahlen umgewandelt, in weite Fernen verschickt und am Empfangsort wieder in elektrische Energie zurückverwandelt – eine drahtlose Energieübertragung! Als Problem erweist sich aber die Tatsache, daß der Laserstrahl nur geradeaus läuft und schon durch schlechte Witterung (Regen und Nebel) gestört wird; die Richtung läßt sich leicht durch Spiegel ändern. Vielleicht wird man einmal Laserstrahlen durch luftleere, innen verspiegelte Röhren schicken? Man versucht auch, den Strahl durch Faser-Lichtleiter zu senden. Ein solcher Leiter hat 2,5 bis 10 mm Durchmesser; er besteht aus sehr vielen mikroskopisch feinen Fäden aus Glas oder Plast (mit 10 bis 30 Tausendstel mm Durchmesser), die parallel zu Lichtleitbündeln zusammengebunden sind. Die „Totalreflexion“ läßt auch bei Krümmungen des Leiters kein Licht nach außen entweichen; alle innen flach (in kleinem Winkel) an die Außenwand fallenden Strahlen werden wieder nach innen zurückgebogen (reflektiert). Der Laserstrahl macht dadurch alle Biegungen des Leiters mit und kommt am anderen Ende mit fast gleicher Lichtstärke wieder heraus – ähnlich wie ein Wasserstrahl aus einem Gartenschlauch.

Diese Faseroptik hat sich schon viele Gebiete der Naturwissenschaften, Technik und Medizin erobert. Wenn zum Beispiel ein Arzt ein

inneres Organ des Körpers, etwa die Niere oder den Magen, untersuchen will, braucht er dazu helles (normales) Licht; durch den Faserlichtleiter kann er es auch auf gekrümmtem Wege in das Organ leiten. Ein weiteres Bündel, bei dem die Fasern am Eingang zueinander genauso angeordnet sein müssen wie am Ausgang im Organ (ein geordnetes Lichtleitbündel), vermittelt ihm ein genaues Bild der beleuchteten Fläche im Körperorgan. Jede der hunderttausend oder mehr Fasern gibt einen Lichtpunkt nach außen; aus den Tausenden von Lichtpunkten setzt sich das Bild genauso zusammen wie ein gedrucktes Bild aus vielen einzelnen Rasterpunkten.



Bildleitbündel mit quadratischer Querschnittsfläche

## Ein Wort zum Schluß

Den Hoffnungen und Erwartungen sind kaum noch Grenzen gesetzt; man möchte fast sagen, der Strom der Physik sei zu einem Ozean geworden. Max Born teilte die Geschichte der Physik in zwei große Teile; für ihn reicht der erste von Anbeginn bis 1942. In diesem Jahr wurde der erste Kernreaktor gebaut. Bis dahin hatten die Menschen Energie unmittelbar oder mittelbar von der Sonne, zum kleinen Teil auch von Wasser- und Windkräften und aus der Muskelkraft bezogen. Dann begann der zweite Teil der „energetischen Geschichte der Menschheit“, die ungeahnte Möglichkeiten bietet und uns verpflichtet mitzuwirken, daß die Erkenntnisse, die den Menschen mächtige Energien in die Hand geben, nicht mißbraucht, sondern zum Nutzen der Menschheit eingesetzt werden!

So wuchs die Physik heran, wurde aus einer Quelle zum gewaltigen Strom, entwickelte sich vom Massenpunkt über das Feld zur modernen Physik, die mit Hilfe von Relativitätstheorie und Quantenmechanik alles vereinigt, was bisher erforscht wurde, und die neue Erkenntnisse verheißt, die wir bestenfalls ahnen können. Viele Forscher sind berühmt geworden; aber wir wollen auch daran denken, daß Tausende Ungenannter an dem großen Werk mitgebaut haben. Ihre Spuren hier und da nachzuzeichnen, um Verständnis für die Physik und ihre Forscher zu werben, versuchte dieses Buch.

# STICHWORTVERZEICHNIS

- Abelson 174
- absoluter Nullpunkt 59
- Aggregatzustände 72
- Ägypten 11
- Alkoholthermometer 57
- Alpha-Strahlen 157, 169
- Ampère, A. M. 123, 129
- Amontons, G. 59
- Anaxagoras 13
- Anaximander 12
- Antenne 141
- Antiteilchen 171
- Arago, D. F. 122, 134
- Aragos Scheibe 122, 134
- Archimedes 15, 26
- Aristoteles 14, 22, 32, 50, 73
- Ash 115
- astatisches Nadelpaar 124, 134
- Astronomie 34, 47
- Astrophysik 147
- Äther 14, 147
- Atom 13, 167, 169
- Atombombe 174
- Atomhülle siehe Elektronenhülle
- Atomkern 169, 171
- Atomkraftwerk siehe Kernenergie-  
werk
- Atommodell 170, 177
- Auftrieb 15
- Avogadro, A. 71
- Avogadrosche Zahl 72
  
- Bacon, F. 38, 55, 60
- Bacon, R. 23, 32, 74
- Barometer 40
- Barometer, Aneroid- 54
- Barometer, Heber- 47
- Barometer, Quecksilber 40, 47
- Barometer, Wasser- 42
- Barrow, I. 50, 52
- Bassow, N. 179
- Becherapparat von Volta 113
- Becquerel, H. A. 167
- Befragen der Natur 32
- Beharrungsgesetz 19
- Bell, A. G. 143, 144
- Bereiche der Natur 53, 136, 147
- Bernoulli, D. 71
- Bernstein 11, 77
- Beschleuniger 147, 175
  
- Beta-Strahlen 157, 169
- Bewegungsenergie der Moleküle  
71
- Bewegungsgesetz von Newton 52
- Bezugssystem 156
- Black, J. 64
- Blitzableiter 90, 96
- Bohr, N. 153, 170
- Boltzmann, L. 72
- Born, M. 183
- Bose, G. M. 79, 85
- Boyle, R. 39, 43, 48, 62, 79
- Brahe, T. 35, 52
- Branly, E. 139
- Brechung der Lichtstrahlen 21,  
39, 178
- Breguet, A. L. 61, 140
- Brentjes, B. 113
- Brown, R. 72
- Brownsche Bewegung 72
- Bruno, G. 31
  
- Carlisle, A. 115
- calor 64
- Carnot, N. S. 65, 146
- Cartesius siehe Descartes
- Cartesianischer Taucher 39
- Celsius, A. 58, 59
- Chappe, C. 117
- Charles, J. 60
- Chemie 129
- chemische Wirkung des  
galvanischen Stromes 115
- chromatische Polarisation 123
- Clausius, J. E. 71, 165
- Compton, A. G. 153
- Coulomb, Ch.-A. 90
- Coulombsches Gesetz 90
- Curie, M. 167
- Curie, P. 167
  
- d'Alibard 91
- Dampfkreisell 19
- Dampfmaschine 19, 45, 63
- Dampfmaschine von Papin 63
- Davy, H. 66, 115, 116, 128, 134, 146
- Demokrit 13
- Descartes, R. 38, 53
- Deuterium 172

Doppelnatur des Lichtes 154  
 drahtlose Telegrafie 139, 141  
 Drehwaage 90, 125  
 Dufay, Ch. 82, 84, 94  
 Dumas, J.-B. 134  
 Dynamo 133, 138  
 dynamoelektrische Maschine 137  
 dynamoelektrisches Prinzip von  
   Siemens 137  
  
 Einstein, A. 52, 53, 150, 155  
 elektrische Entladung als Funken,  
   Büschel, Licht 85  
 elektrische Funkentladungen 79,  
   85  
 elektrische Leitfähigkeit 124  
 elektrische Materie 92  
 elektrische Nachrichtentechnik  
   117  
 elektrische Spannung 111, 123  
 elektrische Spannungsreihe 111  
 elektrische Spitzenwirkung 79,  
   84, 85, 90  
 elektrisches Licht 80  
 elektrischer Strom 98, 110, 123  
 elektrischer Strom,  
   chemische Wirkung des 115  
 elektrischer Strom,  
   magnetische Wirkung des 119  
 elektrischer Strom,  
   Wärmewirkung des 114  
 elektrischer Strom,  
   Wirkungen des 110, 114, 120  
 elektrisches Fluidum 78, 114  
 elektrisches Organ 98, 106  
 elektrisches Pendel 106  
 elektrischer Widerstand 124, 126  
 elektrischer Widerstand, innerer  
   126  
 elektrische Wirbelströme 122  
 Elektrisiermaschine 43, 54, 78,  
   85, 86, 99, 117  
 Elektrizität durch Reibung 43, 75,  
   77  
 Elektrizität, galvanische 98  
 Elektrizität in der Medizin 90, 114  
 Elektrizität, metallische 110  
 Elektrizität, statische 110  
 Elektrizität, strömende 98  
 Elektrizität, tierische 98, 102, 106  
 Elektrizitätsmenge 116  
 Elektrizitätstheorie 78, 90, 92, 94,  
   106, 114, 119

Elektrochemie 115, 129  
 Elektrodynamik 113, 121, 140  
 elektrodynamisches Prinzip 133  
 Elektrolyse 115, 129  
 Elektromagnetismus 119  
 elektromagnetische Induktion 131  
 elektromagnetische Lichttheorie  
   von Maxwell 148  
 elektromagnetische Maschinen  
   137  
 elektromagnetische Wellen 136  
 elektromagnetischer Telegraf 138  
 elektromagnetisches Feld 148  
 Elektrometer 90, 117  
 Elektromotor 130, 137  
 elektromotorisches Prinzip 130  
 Elektron 96, 147, 167  
 Elektronenhülle 169, 176  
 Elektronenschalen 177  
 Elektrophor 94  
 Elektroskop 77, 90  
 Elementarteilchen 167, 174  
 Empedokles 13  
 Energie der Bewegung 53  
 Energie der Lage 54  
 Energie-Masse-Gleichung 166  
 Engels, F. 24  
 Erdbeschleunigung 33  
 Erdmagnetismus 74, 124  
 Erhaltung der Energie, Gesetz von  
   der 69  
 Euklid 19  
 Experiment 9, 11, 26, 32  
 experimentelle Methode der  
   Forschung 32  
  
 Fahrenheit, G. D. 58  
 Fallgesetz von Galilei 33  
 Fallmaschine 46  
 Fallrinne 33  
 Faraday, M. 126, 150, 165  
 Faradayscher Käfig 96, 134  
 Farbenringe 51  
 Faseroptik, Laser 182  
 Feld 148, 169  
 Feld, elektromagnetisches 148  
 Feldlinien 77, 129  
 Fernmeldetechnik 138  
 Feldtheorie 135  
 Fermium 174  
 Fernrohr 33, 47  
 Fernsprecher 138  
 Festkörperphysik 146

Feudalismus 22, 24, 38  
 Feuerzeug, elektrisches 101  
 Fieberthermometer 60  
 Fitzgerald 60  
 Flaschenbatterie 89  
 Fliehkraft 47  
 Fluidum, elektrisches 78, 84, 90,  
 96, 114  
 Fluoreszenz 179  
 Franklin, B. 79, 90, 118, 134, 167  
 freier Fall 26, 33  
 freier Wurf 14, 33  
 Freileitung 83  
 Freiluft-Fernrohr 47  
 Fresnel, A.-J. 48, 123  
 Fritter 139  
 Froschschenkelversuche 99  
 Funkeninduktor 136

Galilei, G. 8, 31, 52, 159  
 galvanische Elektrizität 98  
 galvanisches Element 103  
 Galvanismus 110  
 Galvani, L. 98, 113  
 galvanische Kette 126  
 Galvanometer 120, 124  
 Galvanoskop 117, 121  
 Gamma-Strahlen 157, 169  
 Gamow 166  
 Gasentladungslampe 180  
 Gas, ideales 45, 59  
 Gauß, C. F. 138  
 Gay-Lussac, L.-J. 59, 68, 71, 129  
 Geltungsbereiche 164  
 Generator 137  
 Geometrie 38  
 Gesetz von der Erhaltung der  
 Energie 69, 129  
 Gibbs, J. 72  
 Gilbert, W. 75  
 Glaselektrizität 84  
 Gleichstrom 106, 134  
 Gleichstromtechnik 106, 114  
 Glockenspiel, elektrisches 84  
 Gordon, A. 84  
 Gralath 89  
 Gravitation siehe Schwerkraft  
 Gray, St. 71, 82  
 Grenzgesehwindigkeit 162  
 Gren 106  
 Griechenland 10, 17  
 Grundstoffe, vier 13, 14  
 Guericke, O. v. 40, 57, 62, 78, 81

Hahn, O. 172  
 Halbleiterphysik 177  
 Hallwachs, W. 150  
 Harzelektrizität 84  
 Hausen, C.-A. 85  
 Hawksbee, F. 80, 82  
 Hebelgesetz 15  
 Heber 19  
 Heisenberg, W. 171  
 Helmholtz, H. v. 69, 167  
 Heron 19, 25  
 Heronische Formel 19  
 Heronsball 19  
 Hertz, H. 136, 148  
 Hertzsche Wellen 136  
 Himmelsphysik 36  
 Hochspannung 82  
 Holtz, W. 86  
 Hooke, R. 39, 45, 52, 62  
 Hughes, D. E. 139  
 Humanismus 24  
 Humboldt, A. v. 106, 115, 123  
 Hunter, J. 98  
 Huygens, C. 46  
 Huygens, Chr. 39, 46, 148, 149  
 Hydrostatik 26  
 Hypothese 11

Immerbeweger siehe perpetuum  
 mobile  
 Impuls 26  
 Induktion 130  
 Induktion, elektromagnetische  
 131  
 Induktion, Magnet- 133  
 Infinitesimalrechnung 52, 53  
 Influenz 84, 102  
 Influenzelektrizität 86  
 Influenzmaschine 86  
 Inklinationsnadel 120  
 Inquisition 31  
 Isidor 73  
 Isotope 171

Jacobi, M. H. 137  
 Joule, J. P. 70

Kapazität 94  
 Kapitalismus 24  
 Kelvin, Lord (William Thompson)  
 59, 72

Kepler, J. **34**, 52, 76  
 Keplersche Gesetze **36**, 52  
 Kernenergie **171**, **178**  
 Kernenergiwerk **174**  
 Kernphysik **147**  
 Kernreaktor **174**  
 Kernspaltung des Urans **172**  
 Kettenreaktion **174**  
 kinetische Gastheorie **71**  
 Kirchhoffsche Regeln **126**  
 Kleist, E. G. v. **87**  
 Kleistsche Flasche **87**  
 Kohärer **139**  
 kommunizierende Röhren **26**  
 Kompaß **73**, **75**, **77**  
 Kompaßnadel, Ablenkung der **119**  
 Kondensator **89**, **94**, **122**, **142**  
 Konduktor **85**, **90**  
 König, F. W. **113**  
 Koordinaten-System **156**  
 Kopernikus, N. **30**, **52**, **57**  
 Korpuskel-Optik **51**  
 Kraft **53**  
 Kraftlinien siehe Feldlinien  
 Kreisstrom **103**, **111**  
 Kristallgitter **177**  
 Kristallphysik **177**  
 Ktesibios **19**  
 künstliche Radioaktivität **172**  
 Kurtschatowium **175**  
  
 Lager **28**  
 Landau, L. **163**  
 Laser **179**  
 Laser-Faseroptik **181**  
 Laserstrahlen, Anwendung der **181**  
 Laserstrahlung **180**  
 Lasertechnik **180**  
 latente Wärme **64**  
 Lavoisier, A.-L. **65**  
 Lawrencium **175**  
 Lebedew, P. **166**  
 Leibniz, G. W. **52**, **53**, **79**  
 Leidener Flasche **82**, **87**, **98**, **117**  
 Leiter und Nichtleiter, elektrische **83**  
 Leiterklassen **111**  
 Lenin, W. I. **14**  
 Leukipp **13**  
 Leonardo da Vinci **25**, **38**, **46**, **50**  
 Leonardo, technische Entwürfe **28**

Leuchtstoffröhren **81**  
 Licht **48**, **51**, **136**, **148**, **178**  
 Lichtäther **148**  
 Licht, Doppelnatur des **51**, **154**  
 Licht, elektrisches **80**  
 lichtelektrischer Effekt **150**, **152**, **178**  
 Lichterscheinungen **178**  
 Lichtgeschwindigkeit **53**, **147**, **162**  
 Lichtgeschwindigkeit, Messen der **163**  
 Lichtquant **151**, **167**, **171**, **179**  
 Licht, Reflexion des **25**  
 Licht, Streuung des **25**  
 Lichtstrahlen, Brechung der **21**, **51**, **152**, **203**  
 Licht, Teilchennatur des **51**, **170**  
 Licht, Wellennatur des **48**, **169**  
 Lichtenberg, G. Chr. **92**, **94**, **96**  
 Lichtenbergsche Figuren **95**  
 Lieberkühn **89**  
 Liebig, J. v. **68**  
 Linienspektrum **157**, **179**  
 Loschmidt, J. **72**  
 Loschmidtsche Zahl **72**  
 luftleerer Raum siehe Vakuum  
 Luftpumpe **41**, **43**, **48**  
 Lumineszenz **178**

Magdeburger Halbkugeln **41**  
 magnetelektrische Maschine **137**  
 Magnetfeld **77**, **121**, **148**  
 Magnetismus **11**, **73**  
 magnetische Wirkung des elektrischen Stromes **119**  
 magnetisches Kraftfeld **77**, **121**, **148**  
 Magnetpole **74**  
 Marconi, G. **141**  
 Maricourt (Peregrinus) **74**  
 Mariotte, E. **43**, **62**, **71**  
 Marx, K. **14**  
 Materialismus **14**, **38**  
 Maximum- und Minimum-thermometer **60**  
 Maxwell, J. C. **72**, **124**, **135**, **148**  
 Maxwellsche Feldgleichungen **129**, **135**  
 Maxwellsche Gleichungen **148**, **166**  
 Maxwells Verteilungsgesetz **72**  
 Mayer, J. R. **67**, **129**  
 McMillan **174**  
 Mechanikerschule, erste **21**  
 mechanisches Wärmeäquivalent **68**



- Meitner, L. 172  
 Mendeleevium 175  
 Mericourt, P. v. siehe Peregrinus  
 Meson 171  
 Metallthermometer 60  
 metallische Elektrizität 110  
 Meteorologie 45  
 Michelson, A. 162  
 Michelsonscher Versuch 163  
 Mikrophysik 147, 178  
 Mikroskop 46  
 Mischungstemperatur 64  
 Molekularbewegung 67  
 Molekularströme 124  
 Monochord 12  
 Morse, S. 139  
 Morse-Telegraf 139  
 Multiplikator 121, 126  
 Musschenbroek, P. 89
- Nachrichtentechnik, elektrische  
 117, 177  
 Nadel-Telegraf 139  
 Naturgesetz 13, 32  
 natürliche Radioaktivität 167  
 Neptunium 174  
 Neutron 171  
 Newcomen, Th. 45, 63  
 Newton, I. 19, 50, 60, 82, 149  
 Newtonsche Mechanik 52  
 Nicholson, W. 115  
 Nobelium 175  
 Nollet, J.-A. 89  
 Nullmeridian 160
- Oersted, H. Chr. 119, 129  
 Ohm, G. S. 124, 129  
 Ohmsches Gesetz 126  
 Optik 9, 15, 20, 36, 39, 46, 50, 53,  
 123, 136  
 Oszillator 136
- Papin, D. 45, 62  
 Papinscher Topf 63  
 Parallelschaltung 119  
 Parallelschaltung der Elemente  
 119  
 Partikelströme 124  
 Pascal, B. 39, 40, 53  
 Pendel 33  
 Pendeluhr von Galilei 33
- Peregrinus 74, 76  
 Periodensystem der Elemente  
 167, 174  
 perpetuum mobile 26, 67, 69, 115  
 Philon 19, 55  
 Phosphoreszenz 178  
 Photon 149, 167, 178  
 Physik 10  
 Physik der Gase 43  
 Physik, Gliederung der 146  
 Physik, klassische 10  
 Physik, moderne 10, 146  
 Picard, J. 80  
 Pierczynski 113  
 Pixii 137  
 Planck, M. 52, 148, 150, 155  
 Plancksches Wirkungsquantum  
 151  
 Planta, M. v. 86  
 Plato 15, 73  
 Plutonium 174  
 Poincaré 148  
 Polariskop 123  
 Polarität 12, 74  
 Polsunow, I. 45  
 Polonium 167  
 Popow, A. S. 141  
 Positron 171  
 Poulsen, W. 142  
 Primärelement 110  
 Primärelemente v. u. Z. 113  
 Prochorow, A. 179  
 Proton 96, 147, 171, 174  
 Protonen-Karussell 147  
 Ptolemaeus, C. 21, 22, 30  
 Pulverpumpe 48  
 Pyrometer von Newton 61, 63  
 Pyrometer, Strahlungs- 61  
 Pythagoras 11, 12  
 Pythagoräer 12
- Quantenbahnen 177  
 Quantensprünge der Elektronen  
 153, 179  
 Quantentheorie 150, 155  
 Quecksilberthermometer 58
- Radargerät 181  
 Radioaktivität, künstliche 172  
 Radioaktivität, natürliche 167  
 Radium 167  
 Réaumur, R.-A. 59, 98

Rechenmaschine, mechanische 40, 53  
 Reflexion des Lichtes 25  
 Reibkissen 85  
 Reibungselektrizität 43, 77, 82, 87  
 Reibungselektrizität in der Medizin 90  
 Reibungselektrizität, Spiele mit 83, 84, 85, 89  
 Reibung 26  
 Reihenschaltung 111, 113, 120, 126  
 Reil 106  
 Reimer 163  
 Reis, Ph. 142  
 relative Bewegung 158  
 relative Geschwindigkeit 160  
 relative Länge 164  
 relative Masse 164  
 relativer Raum 156  
 relative Zeit 164  
 Relativitätstheorie 150, 155  
 relativistische Physik 155  
 Religion, christliche 22  
 Renaissance 24  
 Resonator 136  
 Ritter, I. W. 115, 123, 124  
 Röhren, kommunizierende 26  
 Römer, O. 39, 58  
 Rom 17, 21  
 Röntgenstrahlen 153  
 Rubinkristall 180  
 Rückstoß 19  
 Rumford, Graf (B. Thompson) 67  
 Rutherford 60  
 Rutherford, E. 169

Savery, Th. 45, 63  
 Schaffer, J. G. 90  
 Schallgeschwindigkeit 162  
 Schallwellen 26  
 Schaltung, Parallel- 126  
 Schaltung, Reihen- 111, 113, 120, 126  
 Scheiner, Chr. 35  
 Schnellkochtopf 63  
 Schreibtelegraf 138  
 Schrödinger, E. 171  
 Schweigger, J. S. 121  
 Schwerkraft 36, 46, 50, 52  
 Schwimmerregel 120  
 Schwingungserzeuger 136  
 Seger, H. 61  
 Segerkegel 61  
 Selbstinduktionsstrom 134

Sicherheitsventil 63  
 Siemens, W. 137, 138  
 Sklavenhaltergesellschaft 10  
 Sinustafel 21  
 Snellius 21  
 Solenoid 124  
 Sommerfeld, A. 170  
 Sömmering, S. Th. 117  
 Sonnenbatterie 151  
 Spannung, elektrische 94, 111  
 Spannungserzeuger 134, 137  
 Spannungsreihe 111  
 Spektroskopie 179  
 Spektrum 152, 157, 179  
 spezifische Wärme 67  
 Sphärenmusik 37  
 Spiegelteleskop 50  
 Spitzenkamm 85, 86  
 Spitzenrad 84  
 Spitzenwirkung, elektrische 79, 84, 85, 90  
 Starkstromtechnik 137  
 statisches Verfahren 72  
 Steinheil, C. A. v. 138  
 Steuer- und Regeltechnik 178  
 Stöhrer 137  
 Stoney 167  
 Stopfbuchse 85  
 Strahlungspyrometer 61  
 Straßmann, F. 172  
 strömende Elektrizität 98  
 Sturm, J. Chr. 60  
 Supraleitung 164  
 Symmer, R. 94, 96  
 System 156

Teilchennatur des Lichtes 150  
 Telegraf, elektrochemischer 117  
 Telegraf, Morse- 139  
 Telegraf, Nadel- 139  
 Telegraf, optischer 117  
 Telegraf, Schreib- 138  
 Telegraf, Typendruck- 139  
 Telegraf, Zeiger- 139  
 Telegrafie, drahtlose 141  
 Teleobjektiv 36  
 Tesla, N. 141  
 Tesla-Transformator 141  
 Thales 11, 12, 73  
 Thermodynamik 65, 69  
 Thermoelement 125  
 Thermometer 55, 57  
 Thermometer, Alkohol- 52

- Thermometer, Fieber- 60  
 Thermometer, Luft-Differential- 60  
 Thermometer, Metall- 60  
 Thermometer, Maximum- und Minimum- 60  
 Thermometer, Quecksilber- 58  
 Thermometer-Skale 57, 58, 59  
 Thermometer, Tiefsee- 60  
 Thermometer für hohe Temperaturen 61  
 Thermoskop 57  
 Thermoskop, Luft- 57  
 Thompson, B. (Graf Rumford) 66, 67  
 Thompson, W. (Lord Kelvin) 59, 72  
 Thomson, J. J. 169  
 Thorium 167  
 Tiefseethermometer 60  
 tierische Elektrizität 98, 102, 106  
 tönender Lichtbogen 142  
 Toepler, A. 86  
 Torricelli, E. 39, 41  
 Torricellische Leere 39, 80  
 Torricellischer Raum 46, 94  
 Torsions-Galvanometer 126  
 Totalreflexion 181  
 Townes, Ch. 179  
 Transformator 133  
 Transistortechnik 177  
 Transurane 174  
 Typendrucktelegraf 139  
  
 Überlagerung von Wellen 149  
 Übertrager 32  
 Umspanner 132, 133  
 Umwandlungsreihe 167  
 Unipolarmotor 130  
 Uran 167, 172  
 Urharmonien in der Musik 12, 35, 37  
 Ursubstanz 11, 12  
  
 Vakuum 32, 41, 63  
 Verkupfen 116  
 Vinci siehe Leonardo da vis electrica 77  
 Volt 111  
 Volta, A. 94, 106  
 Voltameter 117  
 Volta-Säule 111, 119, 126  
 Voltas Versuche 107  
  
 Waals, J. van der 177  
 Wall 79  
 Walsh 98  
 Wärme als Bewegung kleinster Teilchen 55, 71  
 Wärmeäquivalent, mechanisches 68  
 Wärmeeinheit 64  
 Wärmeenergie 70  
 Wärmeflüssigkeit (Wärmestoff) 64, 67  
 Wärmekapazität 64  
 Wärme, latente 64  
 Wärme, spezifische 67  
 Wärmelehre 55  
 Wärmestoff 64, 71  
 Wasserpumpen 48, 62  
 Watson 89  
 Watt, J. 45, 63  
 Weber, W. 138  
 Wellen, elektromagnetische 135  
 Wellennatur des Lichtes 149  
 Wellenoptik 48  
 Weltäther 14, 147, 163  
 Weltharmonie 36  
 Weltsystem, geozentrisches 21  
 Weltsystem, heliozentrisches 30, 36  
 Weltzeituhr 160  
 Wetterkunde 45  
 Wheatstone, Ch. 126, 139  
 Wichte 15  
 Windrad 19  
 Winkler, J. H. 85, 91  
 Wirbelstrom 122, 134  
 Wirbelstrombremse 122  
 Wirkungen des elektrischen Stromes 120  
 wissenschaftlich-materialistische Naturforschung 38, 40  
 Wurf 14, 33  
  
 Yukawa, N. 177  
  
 Zeeman, P. 167  
 Zeigertelegraf 139  
 Zentrifugalpumpe 62  
 Zerfallsreihe 167  
 Zitteraal 106  
 Zitterrochen 98, 114  
 Zitterwels 98, 106  
 Zyklotron 172

# INHALTSVERZEICHNIS

|     |                                                                       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------|
| 5   | Vorwort                                                               |
| 7   | Auch der größte Strom hat eine kleine Quelle                          |
| 10  | An der Quelle einer Wissenschaft                                      |
| 22  | Die Wissenschaft wird in einen<br>tausendjährigen Schlaf versetzt     |
| 24  | Die Wiedergeburt der Naturwissenschaft                                |
| 38  | Physik und Mathematik verbünden sich                                  |
| 50  | Newton vollendet das Gebäude der Mechanik                             |
| 55  | Die Lehre von der Wärme                                               |
| 55  | Vom Werden des Thermometers                                           |
| 62  | Wesen und Gesetze der Wärme werden erforscht                          |
| 65  | Die Thermodynamik                                                     |
| 73  | Magnetismus und Reibungselektrizität                                  |
| 73  | Das Anziehende wurde zuerst entdeckt                                  |
| 74  | Ein Pilger findet den Erdmagnetismus                                  |
| 75  | Der Vater der Elektrizität                                            |
| 80  | Das erste elektrische Licht                                           |
| 82  | Die erste Hochspannungsleitung                                        |
| 84  | Von Elektrisiermaschinen und Verstärkern                              |
| 87  | Die Elektrizität wird gesammelt                                       |
| 90  | Medicina sine medicamento                                             |
| 98  | Die strömende Elektrizität                                            |
| 114 | Der elektrische Strom offenbart seine Eigenschaften                   |
| 117 | Die elektrische Nachrichtentechnik macht<br>die ersten Schritte       |
| 118 | Wie hängt der Magnetismus mit der<br>Elektrizität zusammen?           |
| 124 | Das Grundgesetz des elektrischen Stromes wird gefunden                |
| 126 | Die letzten großen Entdeckungen der klassischen<br>Elektrizitätslehre |
| 130 | Die Physik der Fernwirkung wird zur Feldphysik                        |
| 137 | Die ersten elektromagnetischen Maschinen                              |
| 138 | Telegraf und Fernsprecher verbinden<br>Menschen und Erdteile          |
| 146 | Das Zeitalter der neuzeitlichen Physik beginnt                        |
| 149 | Um die Erklärung der Natur des Lichtes<br>wurde heftig gestritten     |
| 154 | Das Licht hat zwei Gesichter                                          |
| 155 | Relativitäts- und Quantenphysik                                       |
| 156 | Der relative Raum                                                     |
| 158 | Auch die Bewegung ist relativ                                         |
| 160 | Die Geschwindigkeit ist ebenfalls relativ                             |
| 162 | Licht hat die größte Geschwindigkeit                                  |
| 164 | Ist die Masse eines Körpers unabhängig<br>von der Geschwindigkeit?    |
| 167 | Das „Unenteilbare“ (Atom) teilt sich immer mehr                       |
| 171 | Die Erforschung des Atomkerns                                         |
| 176 | Die Erforschung der Atomhülle                                         |
| 179 | Angewandte Atomhüllenphysik: der Laser                                |
| 182 | Ein Wort zum Schluß                                                   |
| 184 | Register                                                              |

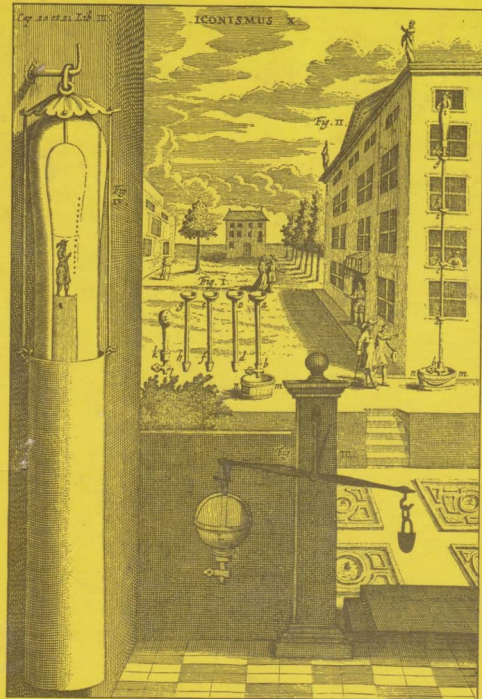
## QUELLENVERZEICHNIS

Die Abbildungen entnahmen wir mit freundlicher Genehmigung der Verlage folgenden Büchern:

- H. Baeblich · Das Buch der Physik  
Hahnes Buchhandlung, Berlin 1881
- Die berühmten Erfinder, Physiker und Ingenieure  
Lucien Mazoned, Paris
- R. H. Blochmann · Physik, Band I  
Verlag Strecker und Schröder, Stuttgart 1900
- E. T. Canby · Geschichte der Elektrizität  
Edition Rencontre Erik Nitsche International 1963
- J. Cuthberson · Abhandlung von der Electricität  
Leipzig, im Schwickertschen Verlag 1786
- F. M. Feldhaus · Leonardo, der Techniker und Erfinder  
Eugen Dieterich, Jena 1913
- F. Fraunberger · Elektrizität im Barock  
Aulis Verlag Deubner u. Co. KG, Köln
- F. Fraunberger · Vom Frosch zum Dynamo  
Aulis Verlag Deubner u. Co. KG, Köln
- G. Gamow · Biografie der Physik  
Econ Verlag, Düsseldorf und Wien 1965
- E. Gerland und F. Traumüller · Geschichte der physikalischen  
Experimentierkunst  
Georg Olm Buchhandlung, Leipzig 1899
- G. Harich · Die Tat des Kopernikus  
Urania Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1964
- J. A. Nollet · Lettres sur l'electricite  
Guerin et Delatour, Paris 1764
- C. Ramsauer · Grundversuche der Physik in historischer Darstellung  
Julius Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953
- H. C. A. Reichen · Geschichte der Physik  
Edition Rencontre Erik Nitsche International 1963
- A. Zischka · Pioniere der Elektrizität
- C. Bertelsmann Verlag, Gütersloh 1958

## FOTOVERZEICHNIS

- ADN-Zentralbild, Berlin (3)
- Deutsche Fotothek, Dresden (13)
- Deutsches Museum, München (16)
- Physikalische Sammlung im Hessischen Landesmuseum Darmstadt (1)
- Postmuseum, Berlin (3)
- Staatlicher Mathematisch-Physikalischer Salon, Dresden (11)



Nicht nur rund um die heutige Physik führt unser Buch, sondern auch Jahrhunderte und Jahrtausende weit zurück. Dabei erleben wir mit, wie einige wichtige Zweige dieser Wissenschaft aus kleinen Anfängen entstanden und zu mächtigen Wissensgebieten herangewachsen sind, die längst das Leben der Menschheit mitbestimmen. – Oft abenteuerliche Wege mußten die Forscher gehen, um die Gesetze der Natur zu erkennen – etwa in der allgegenwärtigen Mechanik oder im Wirken der Wärme. Die seltsame Doppelnatur des Lichtes wurde aufgedeckt und das Elektron gefunden, das ebenso winzig wie wichtig in der Natur und in der Technik ist. Die Ausblicke für die Forschung und ihre Anwendung werden immer weiter und großartiger; die Welt ist erkennbar, aber erst zum Teil erkannt, und die Physiker forschen unermüdlich weiter.



DER  
KINDER  
BUCH  
VERLAG